



TUGAS AKHIR - TM 141585

STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN DOUBLE GUIDE VANE PADA VARIASI SUDUT BUKAAN DAMPER

GLADHI DWI SAPUTRA
NRP. 2114 105 017

Dosen Pembimbing
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT - TM 141585

**NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH
SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90° WITH
DOUBLE GUIDE VANE IN VARIATION OF
OPENING ANGLE OF DAMPER**

GLADHI DWI SAPUTRA

NRP. 2111 030 013

Academic Advisor

Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

Industrial Technology Faculty

Sepuluh Nopember Institute Of Technology

Surabaya

2016

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN *DOUBLE GUIDE* *VANE* PADA VARIASI SUDUT BUKAAN DAMPER

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin
Pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

GLADHI DWI SAPUTRA

NRP : 2114 105 017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.
(NIP. 197104051997021001) (Pembimbing)
2. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT.
(NIP. 196202161995121001) (Penguji 1)
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D
(NIP. 196412281990031002) (Penguji 2)
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., Ph.D
(NIP. 197512062005011002) (Penguji 3)

SURABAYA 2016

STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN *DOUBLE GUIDE* *VANE* PADA VARIASI SUDUT BUKAAN *DAMPER*

Nama Mahasiswa : Gladhi Dwi Saputra
NRP : 2111 030 013
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo,
S.T, M.T

Abstrak

Saluran udara merupakan komponen penting untuk mensirkulasikan udara ataupun mengkondisikan udara pada suatu bangunan. Konstruksi saluran udara terdiri dari berbagai komponen, diantaranya yaitu *damper*, *guide vane*, *elbow 90°*, dan lain sebagainya. Sistem saluran udara dimana terdapat aliran fluida yang melintasi *elbow 90°* akan mengalami *pressure drop* lebih besar daripada melintasi saluran udara lurus dengan kecepatan *free stream* sama, sehingga akan terjadi kerugian energi lebih besar.

Model uji yang digunakan dalam penelitian secara numerik ini berupa *ducting* dengan penampang *square* yang terdiri dari: *upstream straight duct*, *square elbow 90°*, *downstream straight duct*, serta dilengkapi aksesoris berupa *double guide vane* dan *damper* yang diletakkan pada jarak $x/D_h=2$ dari *outlet elbow*. Pengukuran parameter-parameternya dilakukan pada setiap *cross section* di sepanjang *downstream straight duct*. Pengujian dilakukan dengan variasi sudut bukaan *damper*.

Dari penelitian ini diperoleh karakteristik aliran pada *downstream* dan nilai *pressure drop* yang terjadi pada setiap variasi. Dilihat dari bentuk profil kecepatan aliran hingga jarak $18 D_h$ belum menunjukkan *recovery* aliran pada bidang horizontal, hal ini dikarenakan hingga jarak $18 D_h$ masih terdapat aliran sekunder. Nilai *pressure drop* sangat dipengaruhi oleh *damper*.

Kata kunci: *Elbow 90°*, *damper*, *pressure drop*, *profil kecepatan*.

NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90° WITH DOUBLE GUIDE VANE IN VARIATION OF OPENING ANGLE OF DAMPER

Name of Student : Gladhi Dwi Saputra
NRP : 2111 105 017
Department : Mechanical Engineering
Counselor Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo,
S.T., M.T.

Abstract

Air duct is an important component to circulate air or air conditioning of a building. Construction of the air duct contained various components, among them are damper, guide vane, elbow 90°, and others. An air duct system in which contained fluid flow across a 90 ° elbow will occur pressure drop which greater than across straight air duct with same free stream velocity, so there will be loss of energy is greater.

The test model used in the study are numerically in the form of ducting with a square cross-section consisting of: upstream straight duct, square elbow 90°, downstream straight duct, and are equipped with accessories such as double guide vane and damper which placed at a distance $x/D_h = 2$ from the outlet elbow. Measurement parameters are performed on every cross section which located along the downstream. straight duct. Testing was done by varying the damper opening angle.

From this research, the characteristics of the flow in the downstream and the value of pressure drop in every variation. Judging from the shape of the flow velocity profile to a distance of $18 D_h$, flow recovery has not shown on the horizontal plane, this is due to a distance of $18 D_h$ there is still a secondary flow. The pressure drop value is affected by the installation of dampers.

Key words: Elbow 90°, damper, pressure drop, velocity profile.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Persamaan Euler Dalam Koordinat Streamline.....	7
2.2 <i>Coefficient Pressure</i> (C_p)	8
2.3 Aliran Fluida di Dalam Pipa	9
2.3.1 Proses Terjadinya Separasi Aliran Pada Elbow....	9
2.3.2 Proses Terjadinya Aliran Sekunder di Dalam Elbow	10
2.4 <i>Grid Independency</i>	12
2.5 Model Turbulensi	12
2.5.1 Model $k-\varepsilon$	13
2.5.2 Model $k-\omega$	13
2.5.3 <i>Reynolds Stress Model</i> (RSM).....	14
2.6 Kondisi Batas	14
2.7 Perbandingan Berbagai Model Turbulensi Pada <i>Bend</i>	15
2.8 Penelitian Aliran Pada Square Ducting Dengan Damper Sebagai Body Pengganggu	16
2.9 Karakteristik Aliran di Dalam Elbow.....	19
2.10 Karakteristik Aliran Yang Melewati Saluran Dengan <i>Butterfly Valve</i> Sebagai Body Pengganggu	23

2.11 Karakteristik Aliran Melalui <i>Rectangular Duct</i> Dengan <i>Elbow 90°</i>	24
2.12 Kondisi Aliran Dekat Dinding	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Geometri Ducting	31
3.2 Metode Numerik	32
3.2.1 Tahap <i>Pre-Processing</i>	33
3.2.2 Tahap <i>Processing</i> Menggunakan Piranti Lunak Simulasi CFD Komersial.....	37
3.2.3 Posisi Pengambilan Data Pada Domain Benda Uji.....	38
3.2.4 Tahap <i>Post-Processing</i> menggunakan Piranti Lunak Simulasi CFD Komersial	39
3.3 Langkah-Langkah Penelitian	40
3.4 Analisa <i>Grid Independency</i>	41
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan <i>Ducting</i> Pada Setiap Variasi	45
4.1.1 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan <i>Ducting</i> Tanpa <i>Damper</i> Dengan <i>Ducting</i> Pada Sudut Bukan <i>Damper 0°</i> Saat $Re = 7,88 \times 10^4$	45
4.1.2 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan <i>Ducting</i> Tanpa <i>Damper</i> Dengan <i>Ducting</i> Pada Sudut Bukan <i>Damper 30° CW</i> Saat $Re = 7,88 \times 10^4$	51
4.1.3 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan <i>Ducting</i> Tanpa <i>Damper</i> Dengan <i>Ducting</i> Pada Sudut Bukan <i>Damper 30° CCW</i> Saat $Re = 7,88 \times 10^4$...	57
4.2 Vektor Kecepatan Setiap <i>Cross-Section</i> Pada Seluruh Variasi Model Uji <i>Ducting</i> Saat $Re = 7,88 \times 10^4$	64
4.2.1 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap <i>Cross-Section Ducting</i> Tanpa <i>Damper</i>	64
4.2.2 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap <i>Cross-Section Ducting</i> Pada Sudut Bukan <i>Damper 0°</i>	66
4.2.3 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap <i>Cross-Section Ducting</i> Pada Sudut Bukan <i>Damper 30° CW</i>	67

4.2.4 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap <i>Cross-Section</i> <i>Ducting</i> Pada Sudut Buka <i>Damper</i> 30° CCW ...	69
4.3 Perbandingan Pada Setiap Model Uji.....	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Error</i> dalam memprediksi tekanan statis melalui 90° <i>rectangular bend</i> pada masing masing permodelan turbulensi.....	15
Tabel 2.2	Pengaruh penambahan guide vane terhadap pressure drop.....	21
Tabel 3.1	Urutan Langkah Penelitian.....	40
Tabel 3.2	Grid Independency ditinjau dari y^+	41
Tabel 3.3	Grid independency ditinjau dari U_{\max} pada $x/D_h=5$	42
Tabel 4.1	Tabel pressure drop tiap variasi model uji pada ducting.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i>	7
Gambar 2.2	Separasi lapisan batas.....	10
Gambar 2.3	Aliran ideal melalui belokan.....	11
Gambar 2.4	Aliran Sekunder.....	11
Gambar 2.5	Geometri <i>square ducting</i>	17
Gambar 2.6	Penempatan posisi <i>cross section</i>	18
Gambar 2.7	Perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan sepanjang aliran untuk $Re=2.05 \times 10^5$	18
Gambar 2.8	Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada <i>downstream elbow</i>	19
Gambar 2.9	Kontur kecepatan di <i>midspan elbow</i> 90° dengan dua <i>guide vane</i> $Re_{Dh} = 1,2 \times 10^5$	20
Gambar 2.10	Profil kecepatan pada elbow (a) tanpa guide vane, (b) 1 guide vane, (c) 2 guide vane, (d) 3 guide vane.....	22
Gambar 2.11	<i>Test Section</i> serta posisi <i>valve</i> $x/D=1$ dan sudut α	23
Gambar 2.12	Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran dengan <i>elbow</i> (a) sudut $\alpha=0^\circ$ (b) sudut $\alpha=30^\circ$	24
Gambar 2.13	(a) Posisi pengambilan data pada <i>domain</i> uji (b) Mesh pada <i>Volume</i>	25
Gambar 2.14	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen (a) $\phi = 30^\circ$ ($z/D_h = 0.0$) ; (b) $\phi = 60^\circ$ ($z/D_h = 0.0$); (c) Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ and $z/D_h = 0.0$	26
Gambar 2.15	Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen.....	27

Gambar 2.16	Perbandingan <i>velocity magnitude</i> (m/s) <i>midplane</i> pada bilangan <i>Reynolds</i> $1,50 \times 10^5$ dengan penampang 0,2 m x 0,2 m untuk : a) tanpa <i>vane</i> ; b) dengan <i>vane</i>	28
Gambar 2.17	Perbandingan <i>loss coefficient</i> antara saluran tanpa <i>vane</i> dan dengan <i>vane</i> terhadap bilangan <i>Reynolds</i> 3×10^4 hingga 2×10^6	28
Gambar 2.18	Perbandingan <i>loss coefficient</i> saluran untuk : a) 0,6 m x 0,6 m <i>duct elbow</i> dengan <i>vanes</i> ; b) 0,81 m x 0,2 m <i>duct elbow</i> dengan <i>vanes</i> ; c) perbandingan ketiga pemodelan CFD dengan <i>vanes</i>	29
Gambar 3.1	Geometri <i>ducting</i>	32
Gambar 3.2	Model Geometri <i>Square Ducting</i>	33
Gambar 3.3	<i>Mesh</i> pada <i>Ducting</i>	34
Gambar 3.4	<i>Domain</i> pemodelan dari <i>Square Ducting</i>	37
Gambar 3.5	Posisi pengambilan data di sepanjang <i>downstream</i>	38
Gambar 3.6	Penomoran posisi tiap <i>cross-section</i> di sepanjang <i>downstream</i>	38
Gambar 3.7	Variasi sudut bukaan <i>damper</i> pada <i>square ducting</i>	39
Gambar 3.8	Grafik <i>grid independency</i> ditinjau dari U_{\max} pada $x/D_h=5$	42
Gambar 3.9	Perbandingan <i>velocity profile</i> pada $x/D_h=5$ terhadap variasi kerapatan <i>mesh</i>	43
Gambar 4.1	Perbandingan perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan aliran antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan <i>damper</i> 0° bidang horizontal.....	46
Gambar 4.2	Perbandingan perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan aliran antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan <i>damper</i> 0° bidang vertikal.....	47

Gambar 4.3	Perbandingan grafik <i>velocity profile</i> secara horizontal antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan damper 0° pada setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	48
Gambar 4.4	Perbandingan grafik <i>velocity profile</i> secara vertikal antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan damper 0° pada setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	50
Gambar 4.5	Perbandingan perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan aliran antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan damper 30° CW bidang horizontal.....	52
Gambar 4.6	Perbandingan perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan aliran antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan damper 30° CW bidang vertikal.....	53
Gambar 4.7	Perbandingan grafik <i>velocity profile</i> secara horizontal antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan damper 30° CW pada setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	55
Gambar 4.8	Perbandingan grafik <i>velocity profile</i> secara vertikal antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan damper 30° CW pada setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	56
Gambar 4.9	Perbandingan perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan aliran antara <i>ducting</i>	

	tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan <i>damper</i> 30° CCW bidang horizontal...	58
Gambar 4.10	Perbandingan perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan aliran antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan <i>damper</i> 30° CCW bidang vertikal.....	59
Gambar 4.11	Perbandingan grafik <i>velocity profile</i> secara horizontal antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan <i>damper</i> 30° CCW pada setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	61
Gambar 4.12	Perbandingan grafik <i>velocity profile</i> secara vertikal antara <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> dan <i>ducting</i> dengan sudut bukaan <i>damper</i> 30° CCW pada setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	62
Gambar 4.13	Visualisasi vektor kecepatan <i>ducting</i> tanpa <i>damper</i> setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	65
Gambar 4.14	Visualisasi vektor kecepatan <i>ducting</i> pada sudut bukaan <i>damper</i> 0° setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	67
Gambar 4.15	Visualisasi vektor kecepatan <i>ducting</i> pada sudut bukaan <i>damper</i> 30° CW setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	68
Gambar 4.16	Visualisasi vektor kecepatan <i>ducting</i> pada sudut bukaan <i>damper</i> 30° CCW setiap posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18.....	70

Gambar 4.17	Perbandingan grafik velocity profile setiap variasi model uji <i>ducting</i> pada <i>outlet elbow</i>	72
Gambar 4.18	Perbandingan vektor kecepatan model uji <i>ducting</i> pada <i>outlet elbow</i> berdasarkan variasi : a) tanpa <i>damper</i> ; b) <i>damper</i> 0° ; c) <i>damper</i> 30° CW ; d) <i>damper</i> 30° CCW.....	74
Gambar 4.19	Perbandingan grafik velocity profile setiap variasi model uji <i>ducting</i> pada jarak $x/D_h=18$..	76
Gambar 4.20	Perbandingan vektor kecepatan model uji <i>ducting</i> pada jarak $x/D_h=18$ berdasarkan variasi : a) tanpa <i>damper</i> ; b) <i>damper</i> 0° ; c) <i>damper</i> 30° CW ; d) <i>damper</i> 30° CCW.....	78

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berjalannya waktu yang diikuti dengan Kebutuhan akan bangunan bertingkat bertambah banyak tiap generasinya, misalnya gedung perkantoran, pusat perbelanjaan, hingga apartemen mewah. Dalam pembangunannya para insinyur tidak melupakan bagian-bagian terpenting dalam menunjang kebutuhan bangunan bertingkat, salah satunya adalah kenyamanan. **Shi-Ming Deng dan John Burnett (2000)** melakukan penelitian terhadap penggunaan energi pada 16 hotel di Hongkong. Hasil yang didapat yaitu konsumsi energi pada gedung-gedung tersebut digunakan antara lain 32% untuk sistem tata udara, 28% untuk *non-electrical*, 23% untuk kebutuhan khusus, 12% untuk sistem cahaya, dan 5% untuk sistem transportasi gedung. Dari data tersebut diperoleh pernyataan bahwa penggunaan energi terbesar terletak pada sistem tata udara. Untuk memenuhi kebutuhan akan sirkulasi udara, maka membutuhkan energi yang cukup besar. Dimana dalam penyaluran udaranya, setiap saluran memiliki kerugian energi. Jika kerugian-kerugian tersebut mampu dikurangi, maka kebutuhan akan energi dapat ditekan sehingga energi yang digunakan lebih efisien.

Saluran udara merupakan komponen penting untuk mensirkulasikan udara ataupun mengkondisikan udara pada sistem dari suatu bangunan. Konstruksi saluran udara terdiri dari berbagai komponen yang sesuai dengan kebutuhan di lapangan. Diantaranya yaitu katup (*valve*), *guide vane*, *elbow 90°*, dan lain sebagainya. Komponen-komponen tersebut juga memiliki fungsi yang berbeda-beda. Diantaranya yaitu, *valve* digunakan untuk mengatur debit aliran udara sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan, *guide vane* digunakan untuk mengarahkan aliran, serta *elbow 90°* merupakan komponen saluran udara yang melengkung membentuk sudut 90° dan berfungsi untuk membelokkan arah aliran udara. Suatu sistem saluran udara dimana terdapat aliran fluida yang

melintasi *elbow* 90° akan mengalami *pressure drop* lebih besar dari pada melintasi saluran udara lurus dengan kecepatan *free stream* yang sama, sehingga akan terjadi kerugian energi yang lebih besar. Konstruksi saluran udara yang optimal diharapkan mampu mengurangi *pressure drop* pada sistem saluran udara suatu bangunan.

Adanya *pressure drop* yang cukup besar maka aliran fluida akan mengalami kerugian energi yang cukup besar pula, sehingga energi yang dibutuhkan untuk mengalirkan fluida semakin besar. Hal tersebut terjadi karena aliran yang mengalir didalam *elbow* 90° mengalami kerugian akibat gesekan (*friction loss*) seperti halnya pada aliran yang mengalir dalam pipa lurus juga akan mengalami kerugian akibat separasi (*separation loss*) dan aliran sekunder (*secondary flow*). Separasi terjadi akibat adanya pembelokan arah aliran fluida pada saluran udara tersebut, sehingga aliran tidak mampu mengatasi kenaikan gradien tekanan (*adverse pressure gradient*) yang mengakibatkan sebagian aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya. Sedangkan *secondary flow* terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada *inner wall* dan *outer wall*. Perbedaan tekanan ini terlihat pada distribusi tekanan di *outer wall* lebih besar dibanding *inner wall*, sehingga memungkinkan partikel fluida pada *outer wall* bergerak menuju *inner wall*. Gerakan partikel ini menyebabkan laju aliran fluida terhambat. *Secondary flow* juga terjadi di *square elbow* 90° pada sisi sudut yang disebabkan adanya interaksi *boundary layer* dengan *endwall* yang mengakibatkan penyumbatan aliran (*blockage effect*). Salah satu usaha yang dilakukan untuk mengurangi besarnya *pressure drop* yang terjadi pada *elbow* 90° yaitu dengan menempatkan suatu gangguan yang memungkinkan dapat meningkatkan kerugian energi, maka diperlukan energi yang besar untuk menanggulangi kerugian yang terjadi sepanjang saluran udara. Penempatan *guide vane* dan *dampner* memungkinkan untuk mengurangi terjadinya turbulensi aliran setelah melalui *elbow* 90° . *Pressure drop* pada komponen tambahan suatu instalasi

akan mempengaruhi aliran didalamnya, dampaknya akan memberikan suatu nilai koefisien tertentu sesuai sudut bukaan.

Namun dengan penambahan *guide vane* memungkinkan *friction loss* meningkat, sehingga *pressure drop* belum tentu berkurang. Hal ini telah dikaji dalam beberapa penelitian terdahulu mengenai aliran yang melalui saluran udara. **Sutardi dkk (2010)** meneliti tentang pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* pada instalasi yang menggunakan *elbow*. *Elbow* yang digunakan adalah *rectangular elbow* 90° dengan 4 variasi pemasangan *guide vane*. *Re* aliran yang melalui *elbow* divariasikan menjadi $2,1 \times 10^4$, $8,4 \times 10^4$ dan 12×10^4 . Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk *Re* rendah, penambahan *guide vane* dapat dikatakan menguntungkan karena dapat mengurangi *pressure drop*. Tetapi saat *Re* pada $8,4 \times 10^4$ dan 12×10^4 , penambahan *guide vane* justru merugikan karena meningkatkan *pressure drop*.

Penelitian yang dilakukan oleh **Rup dan Sarna (2011)** adalah melakukan perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen. Simulasi ini dilakukan pada $Re = 40000$ menggunakan model turbulen *RSM (Reynolds Stress Model)* dengan variasi tiga kerapatan *mesh* yaitu, $V_k = 553.052$, $V_k = 1.766.079$, and $V_k = 1.034.775$, terdapat perbedaan signifikan pada tiap variasi kerapatan *mesh* dan yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada jumlah *mesh* 1.034.775.

Simulasi numerik dengan perangkat lunak STAR-CD dilakukan oleh **Moujaes & Aekula (2009)** yang mengevaluasi perbedaan *pressure drop* pada *elbow* dengan dan tanpa *guide vane* berpenampang *rectangular* pada berbagai variasi bilangan *Reynolds*. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan tiga belas bilangan *Reynolds* pada rentang $1 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$. Hasil simulasi numerik juga dibandingkan dengan beberapa kajian eksperimen dan menunjukkan kesesuaian antara hasil keduanya.

Putra (2016) melakukan studi numerik mengenai fenomena aliran didalam saluran berpenampang *persegi* dengan menempatkan *dampener* dalam saluran. Penelitian dilakukan dengan

memvariasikan sudut bukaan *damper* dan bilangan *Reynolds*. Hasil pada studi numerik didapatkan perlambatan aliran di daerah *elbow*, sesaat sebelum melalui *damper* tidak terpengaruh oleh variasi bilangan *Reynolds*. Melainkan proses *recovery* aliran sangat dipengaruhi oleh variasi sudut bukaan *damper*.

Danbon dan Sollicc (2000) melakukan penelitian secara eksperimen tentang saluran udara berpenampang *circular* dengan *elbow* 90° dan ditambahkan sebuah *damper* yang berupa *butterfly valve*. Hasil pengujian mengatakan adanya perbedaan profil kecepatan antara saluran yang memakai *damper* dan tidak. Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan, maka dilakukan penelitian lebih lanjut tentang karakteristik aliran melewati saluran seperti yang dilakukan oleh **Putra (2016)** dan **Danbon dan Sollicc (2000)** yaitu saluran udara berpenampang persegi akan dipasang *elbow* dan *damper* pada sisi *downstream*. Penelitian dilakukan menggunakan metode komputasi pada bilangan *Reynolds*, $7,88 \times 10^4$ diletakkan pada rasio jarak $x/D = 2$ saat bukaan *valve* 0°, 30° *clockwise* dan 30° *counter clockwise*, kemudian dua *guide vane* dipasang didalam *square elbow*. Hasil yang diamati berupa profil kecepatan, koefisien *losses*, dan visualisasi aliran.

1.2 Perumusan Masalah

Kompleksitas aliran melintasi saluran udara dengan penampang persegi, yang terdiri dari saluran udara berpenampang konstan (*straight duct*), *elbow* 90° dengan *guide vane*, dan penambahan bodi pengganggu berupa *damper* yang sudut bukaannya divariasikan, menjadi inti pembahasan dalam penelitian yang dilakukan secara numerik ini. Suatu aliran yang mengalir didalam saluran udara akan mengalami *pressure drop*. *Pressure drop* ini terjadi dikarenakan adanya *friction loss* dan *separation loss*. Oleh karena itu perlu dilakukan pengamatan lebih lanjut tentang *pressure drop* dalam komponen saluran udara yang terdiri atas *upstream straight channel*, *square-sectioned elbow* 90°, dan *downstream straight duct*. Sehingga didapat konstruksi yang sesuai

untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi dalam suatu saluran udara.

Pada penelitian sebelumnya meningkatnya bilangan *Reynolds* pada *elbow* 90° dengan menambahkan jumlah *guide vane*, justru meningkatkan terjadinya *pressure drop*. Penambahan *guide vane* di dalam *elbow* 90° ternyata tidak menjamin berkurangnya *pressure drop*, namun penambahan *guide vane* ini dapat meminimalkan *separation loss* yang terjadi. Dengan kekurangan yang ada berupa peningkatan *friction loss* dengan menambahkan *guide vane* di dalam *elbow* 90°, sehingga dengan dipasangnya *damper* setelah *elbow* 90° diharapkan adanya perubahan profil kecepatan dan dapat mempengaruhi nilai *pressure drop* yang terjadi. Untuk mengamati hal tersebut maka dirumuskanlah :

1. Bagaimana pengaruh bukaan damper terhadap *pressure drop* pada daerah *downstream straight duct* setelah ditempatkan dua *guide vane* dan *damper*?
2. Bagaimana pengaruh bukaan damper terhadap profil kecepatan aliran pada daerah *downstream straight duct* setelah ditempatkan dua *guide vane* dan *damper*?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sehingga pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar dari tujuan awal. Adapun batasan masalah sebagai berikut :

1. Fluida kerja yang digunakan adalah udara. Aliran fluida yang digunakan adalah *incompressible*, *viscous*, dan *steady*. Aliran *uniform* pada sisi *inlet*.
2. Perilaku aliran yang melintasi saluran udara dianggap memiliki lapis batas turbulen.
3. Studi numerik dilakukan pada kecepatan 10 m/s dengan, bilangan *Reynolds* $7,88 \times 10^4$.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran yang terjadi akibat penambahan dua *guide vane* pada *rectangular elbow* 90° serta sebuah *damper* pada jarak 2Dh dari *outlet* saluran *elbow* 90° pada *downstream straight duct*. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh bukaan damper terhadap nilai *pressure loss* aliran pada daerah sepanjang *downstream straight duct* setelah ditempatkan dua *guide vane* dan *damper*.
2. Mengetahui dan menganalisis pengaruh bukaan damper terhadap profil kecepatan aliran pada daerah sepanjang *downstream straight duct* setelah ditempatkan dua *guide vane* dan *damper*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat setelah melakukan studi numerik ini sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran tentang fenomena aliran yang terjadi saat aliran melintasi suatu bodi pengganggu pada saluran berpenampang persegi.
2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh adanya dua *guide vane* serta variasi sudut kemiringan bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan serta dilengkapi pula dengan referensi mengenai penelitian-penelitian yang terkait.

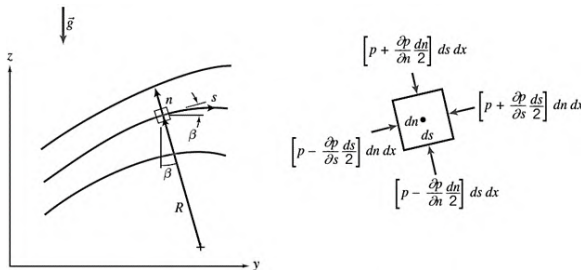
2.1 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*

Streamline adalah suatu garis yang digambarkan dalam medan aliran. Dimana garis yang bersinggungan pada setiap titik dalam satu garis, menyatakan arah kecepatan aliran. Setiap kecepatan aliran hanya diwakili oleh satu *streamline*, sehingga tidak ada aliran yang menyeberangi atau menyinggung *streamline* lain. Hal ini membuat *streamline* seakan-akan menjadi suatu batas padat yang tidak bisa ditembus oleh aliran itu sendiri (*imaginary solid boundary*).

Dari persamaan *Euler* pada *inviscid flow* dapat dibangun persamaan gerak partikel aliran yang diketahui dalam koordinat *streamline* yang dinyatakan pada persamaan 2.1.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.1)$$

Dapat dilihat aliran pada bidang koordinat *yz* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Persamaan gerak dituliskan dalam koordinat *s* (jarak disepanjang *streamline*) dan juga koordinat *n* (jarak normal terhadap *streamline*). Tekanan di pusat dari elemen adalah *p*.



Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline*
(*Fox et al, 2010*)

Dari persamaan 2.1 tersebut menunjukkan hubungan antara kecepatan dengan tekanan partikel fluida di sepanjang *streamline*, dimana saat terjadi penurunan kecepatan maka terjadi peningkatan tekanan, begitu pula sebaliknya. Hal ini sesuai dengan hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa apabila suatu aliran ideal tanpa gesekan dijumlahkan antara komponen tekanan dan kecepatannya pada setiap titik, maka hasilnya adalah sama. Dengan asumsi kondisi aliran *steady*, *body force* diabaikan, *viscous force* diabaikan dan aliran *incompressible*. Sehingga persamaan *Euler* di sepanjang *streamline* ke arah s dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.2)$$

Pada kondisi *steady flow* dimana R adalah kelengkungan dari *streamline*, maka persamaan *Euler* normal dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.3)$$

Untuk persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.4)$$

Pada persamaan 2.4 menunjukkan adanya peningkatan tekanan ke arah luar dari lengkungan *streamline*. Ini terjadi karena gaya yang bekerja pada partikel hanyalah gaya yang berupa tekanan, medan tekanan menyebabkan percepatan sentripetal. Pada daerah *streamline* yang lurus atau radius kelengkungannya (R) tak terhingga maka tidak ada perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline* lurus.

2.2 Coefficient Pressure (C_p)

Dalam sistem *ducting*, sistem perpipaan, atau model pengujian lainnya, sering kali dilakukan modifikasi parameter, $\Delta p / \rho V^2$ dimana Δp merupakan selisih tekanan statis lokal pada

dinding dengan tekanan statis acuan, dengan memasukkan faktor $\frac{1}{2}$ untuk membuat *denominator* menyediakan tekanan dinamik. Maka terbentuklah rasio berikut,

$$C_p = \frac{p_s - p_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (2.5)$$

dimana:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{ref}^2 &= \text{tekanan dinamis di } inlet \text{ elbow} \\ P_s &= \text{tekanan statis lokal pada dinding} \\ P_{ref} &= \text{tekanan statis acuan (referensi)} \\ \rho &= \text{massa jenis fluida pada kondisi kerja} \\ U_{ref} &= \text{kecepatan } freestream \end{aligned}$$

Definisi *coefficient of pressure* pada *elbow* adalah sebagai selisih antara tekanan statis lokal dengan tekanan statis referensi (*freestream*) dibagi dengan tekanan dinamis yang diukur pada bagian sisi *inlet elbow*. Untuk menyatakan besarnya *pressure drop* secara tidak langsung dengan menggunakan C_p . Dalam suatu pengujian, harga C_p sebagai selisih anatara *inlet* dengan *outlet* secara tidak langsung dapat menjelaskan besarnya *pressure drop* disepanjang aliran. Semakin besar selisih C_p antara *inlet* dengan *outlet* maka *pressure drop* yang terjadi akan semakin besar.

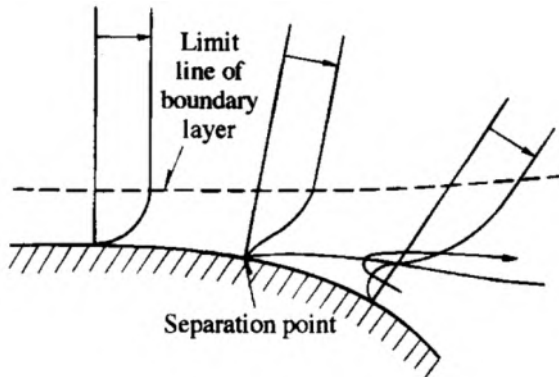
2.3 Aliran Fluida di Dalam Pipa

Adanya saluran belok atau *elbow* dalam suatu sistem perpipaan dapat menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal ini terjadi akibat adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya fenomena separasi dan timbulnya aliran sekunder dalam instalasi perpipaan.

2.3.1 Proses Terjadinya Separasi Aliran Pada Elbow

Separasi aliran merupakan salah satu fenomena yang terjadi pada *elbow* yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan berupa *pressure drop*. Proses separasi diawali dengan adanya fluida yang secara kontinyu melawan gaya gesek dan hambatan berupa *adverse pressure gradient*. Interaksi langsung antara aliran fluida secara kontinyu dengan dinding *elbow* menyebabkan

terjadinya gesekan, dimana gesekan yang timbul dapat mengurangi momentum aliran. Saat momentum aliran tidak mampu lagi untuk mengatasi hambatan berupa *adverse pressure gradient*, maka aliran akan terseparasi dari kontur aliran utamanya dan terbentuk aliran dengan arah berlawanan yang merugikan. Hal ini ditunjukkan dengan perubahan besarnya kecepatan dalam aliran dan terjadinya *vortex* disekitar dinding *elbow*. Besarnya *vortex region* dapat merugikan. Ini terjadi karena adanya penurunan momentum aliran dimana luas penampang aliran utama akan semakin menyempit yang dapat menyebabkan aliran mengalami percepatan pada sisi dengan radius kelengkungan lebih kecil dan terjadinya *pressure drop*. Separasi aliran diilustrasikan pada gambar 2.2.

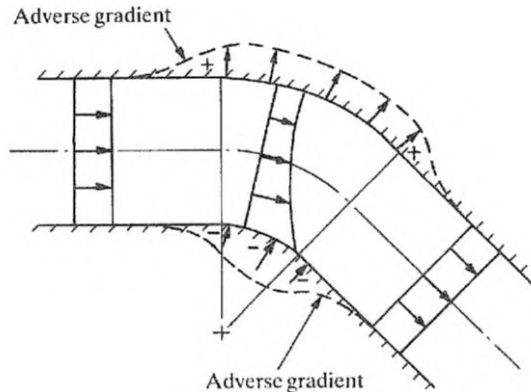


Gambar 2.2 Separasi lapisan batas (Nakayama, 1999)

2.3.2 Proses Terjadinya Aliran Sekunder Di Dalam *Elbow*

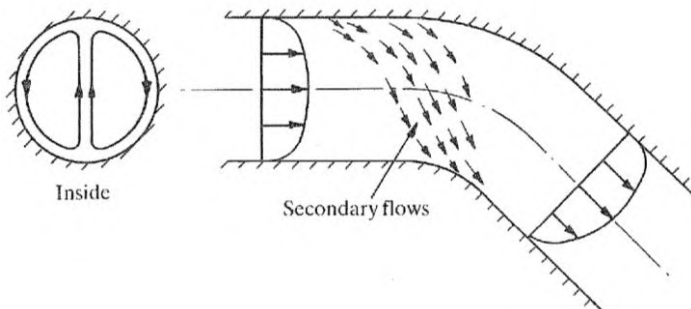
Suatu aliran yang melalui *elbow* tentunya akan terjadi perubahan arah aliran. Adanya perubahan arah aliran ini akan mempengaruhi perubahan tekanan statis dan distribusi kecepatan aliran tersebut, setidaknya dapat menimbulkan dua *adverse pressure gradient* seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Dengan adanya dua *adverse pressure gradient*, maka aliran harus mampu mengatasi kedua *adverse pressure gradient* ini. Apabila aliran tidak mampu mengatasinya, kemudian akan terjadi aliran sekunder

dan turbulensi pada struktur aliran yang disebabkan oleh bentuk saluran yang melengkung.



Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan (Miller, 1990)

Variasi kecepatan aliran dari nol di dekat permukaan saluran hingga kecepatan maksimum pada daerah inti, aliran aktual melalui saluran belok melibatkan distribusi energi yang tidak *uniform*. Pada sisi *inner* dan *outer wall* terjadi perbedaan distribusi kecepatan, ini terjadi karena aliran yang bergerak menuju sisi luar memiliki tekanan statis semakin besar. Adanya perbedaan tekanan pada kedua sisi ini menyebabkan aliran di dalam *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama. Aliran sekunder ini merupakan fenomena aliran tiga dimensi dapat diilustrasikan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Aliran Sekunder (Miller, 1990)

Namun pada *elbow* dengan penampang berbentuk persegi, aliran sekunder yang terjadi berbeda dengan *elbow* dengan penampang lingkaran. Aliran sekunder terjadi karena pada *elbow* dengan penampang persegi terjadi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping sedangkan pada *circular elbow* tidak dijumpai fenomena seperti ini. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi sudut penampang dan sisi samping inilah yang menyebabkan terjadinya aliran sekunder. Ini terjadi karena pada *elbow* dengan penampang persegi timbul aliran sekunder pada sisi yang membentuk sudut penampang.

2.4. Grid Independency

Dalam melakukan penelitian secara numerik akan didapat hasil simulasi yang optimal apabila memperhatikan *grid independency*. *Grid independency* adalah solusi tercapainya hasil konvergen yang ditentukan oleh perhitungan CFD yang tidak bergantung besar kecilnya ukuran dari *mesh*. Jadi dengan melakukan peningkatan jumlah sel *mesh* maka kemungkinan tidak akan mengubah dari *integrated quantities* dan *flow-field solution*. *Grid independency* diindikasikan dengan menghaluskan *mesh*, hal tersebut terus dilakukan hingga solusi numerik yang diperoleh secara simulasi sudah tidak terdapat perubahan secara signifikan pada setiap jumlah *mesh* yang dibuat.

2.5. Model Turbulensi

Sebuah *turbulence model* adalah prosedur komputasi untuk mendekati sistem dari persamaan *mean flow*. Untuk sebagian besar aplikasi di dunia keteknikan, tidaklah perlu untuk melihat hasil detail dari fluktuasi turbulen, yang diperlukan hanyalah untuk mengetahui bagaimana turbulensi memberikan dampak terhadap *mean flow*. Oleh karena itu *turbulence model* haruslah secara luas dapat diaplikasikan, akurat, sederhana, dan ekonomis untuk dijalankan.

2.5.1. Model $k-\varepsilon$

Model $k-\varepsilon$ merupakan model turbulen dengan menggunakan dua persamaan, sehingga memungkinkan kecepatan turbulen dan skala panjang ditentukan secara independen. Model $k-\varepsilon$ difokuskan untuk mekanisme yang memberikan efek terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa) k . Lalu ε merupakan laju disipasi dari k .

- **Standard $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini menggunakan persamaan *transport* dalam penyelesaian model untuk model untuk k dan ε . Model ini dapat digunakan untuk menyelesaikan *bouyancy*, *heating*, dan *compressibility*. Model ini tidak sesuai untuk aliran kompleks yang meliputi separasi dan *strong stream curvature*.
- **RNG (Renormalization-group) $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini merupakan variasi dari model *standard $k-\varepsilon$* . Model ini sesuai untuk aliran yang mempunyai bilangan *Reynolds* rendah dan untuk memprediksi aliran dengan efek *swirling*.
- **Realizable $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini mempunyai beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynolds*, namun konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Model ini mempunyai kelebihan yaitu lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran suatu *jet* atau *nozzle*. Dengan menggunakan model ini dapat memberikan performa bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, separasi, *recirculation*, dan lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar.

2.5.2. Model $k-\omega$

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Dalam model ω ini, sebuah *inverse time scale* terkait dengan turbulensi. Karakteristik numerik dari model ini cukup serupa dengan model $k-\varepsilon$. Dalam model ini ω merupakan *specific dissipation rate*.

- **Standard $k-\omega$:** Pemodelan ini menggunakan dua persamaan *transport model* untuk memecahkan k dan ω . Model ini juga dapat digunakan untuk aliran dengan bilangan *Reynolds* yang rendah. Model ini dapat menampilkan transisi aliran dari yang

awalnya laminar menjadi turbulen. Lalu model ini juga dapat pula menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.

- **SST (*Shear-stress transport*) $k-\omega$:** Model ini merupakan variasi dari model *standard $k-\omega$* yang dikembangkan untuk memadukan formulasi model *standard $k-\omega$* yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model $k-\omega$ yang memiliki keunggulan dalam aliran *free stream*.

2.5.3. *Reynolds Stress Model (RSM)*

Model ini menggunakan tujuh persamaan dalam pendekatannya, sehingga merupakan model turbulensi yang paling teliti. RSM mendekati persamaan *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS) dengan menyelesaikan persamaan *transport* tambahan untuk enam *independent Reynolds stresses*. RSM akurat untuk memprediksi aliran kompleks seperti aliran *cyclone*, aliran berotasi, dan aliran yang terseparasi berat.

2.6. *Kondisi Batas*

Berikut ini adalah beberapa kondisi batas yang tersedia dalam piranti lunak simulasi CFD komersial antara lain:

- ***Velocity inlet*:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran, beserta dengan seluruh properti aliran skalar yang relevan pada *inlet* aliran. Properti *total* (stagnasi) dari aliran tidak tetap, jadi akan meningkat terhadap nilai apapun yang diperlukan untuk menyediakan distribusi kecepatan yang diinginkan. Kondisi batas ini dimaksudkan untuk aliran *incompressible*, dan kondisi ini berguna dalam aliran *compressible* yang akan mengarahkan ke hasil nonfisik karena kondisi ini mengizinkan kondisi stagnasi pada halangan *solid*, karena hal ini dapat menyebabkan properti *inflow stagnation* menjadi sangat tidak seragam.
- ***Out Flow*:** kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar yang mana kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui sebelum solusi masalah aliran dilakukan. Kondisi batas ini tidak dapat digunakan dalam kasus aliran

compressible, aliran *unsteady* dengan densitas bervariasi meskipun merupakan aliran *incompressible*, dan masalah yang melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.

- **Wall:** Kondisi batas ini digunakan untuk daerah fluida dan padat terikat. Dalam aliran *viscous*, kondisi batas tanpa slip diberlakukan pada dinding secara *default*, tetapi dapat juga menentukan komponen kecepatan tangensial dalam hal gerakan translasi atau rotasi dari batas dinding, atau model “slip” dinding dengan menentukan gesekan.

2.7. Perbandingan Berbagai Model Turbulensi Pada Bend

Nur Ikhwan (2009) [6] telah melakukan komparasi aliran melewati rectangular elbow dengan menggunakan model turbulensi Spallart-Allmaras, $k-\omega$, $k-\varepsilon$, dan *Reynolds Stress Model* (RSM).

Tabel 2.1 Error dalam memprediksi tekanan statis melalui 90° *rectangular bend* pada masing-masing permodelan turbulensi (Nur Ikhwan, 2009)

No	Hasil Eksperimen/Simulasi	% Error
1	Eksperimen (Eddy, 2000)	-
2	Spalart-Allamaras	7,53
3	$k-\varepsilon$ Standard	4,52
4	$k-\varepsilon$ RNG	4,66
5	$k-\varepsilon$ Realizable	4,39
6	$k-\omega$ Standart	5,76
7	$k-\omega$ SST	4,99
8	RSM	4,44

Dari informasi pada tabel 2.2 yang menunjukkan nilai *error* pada masing-masing model turbulen, dari ketujuh model

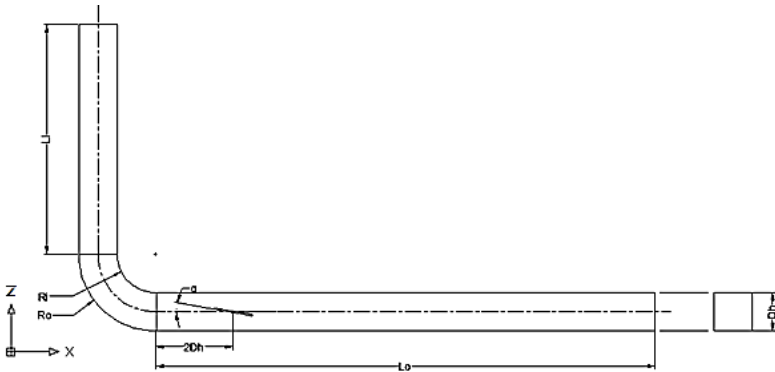
turbulensi yang digunakan untuk memprediksi tekanan statis dinding 90° *rectangular bend*, dapat terlihat bahwa yang memiliki hasil paling baik adalah model turbulensi *Realizable k- ϵ* . Model *Realizable k- ϵ* dikatakan yang terbaik karena memiliki persentase *error* yang terkecil, sebab model turbulen tersebut dapat memprediksi aliran sekunder yang terdapat pada masing-masing sudut pada *ducting* sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan model turbulensi yang lain dalam simulasi aliran pada 90° *rectangular bend*.

Sebelumnya terdapat penelitian untuk mengamati karakteristik aliran melalui *elbow*. Metode yang digunakan dalam penelitian sebelumnya yaitu metode eksperimen dan metode numerik. Variasi yang digunakan yaitu dengan menempatkan bodi pengganggu, baik berupa *valve* pada jarak tertentu serta adanya penempatan *guide vane* di dalam *elbow*. Berikut penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

2.8. Penelitian Aliran Pada *Square Ducting* Dengan *Damper* Sebagai Bodi Pengganggu

Berikut merupakan beberapa penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya pada model uji saluran udara berpenampang persegi dengan menggunakan metode eksperimen dan metode numerik.

Putra (2016) melakukan penelitian dengan metode numerik pada suatu saluran udara berpenampang persegi/*square* dengan *damper* sebagai bodi pengganggu didalamnya, untuk mengamati fenomena aliran akibat pengaruh variasi sudut kemiringan bodi pengganggu dan bilangan *Reynolds* terhadap karakteristik aliran. Simulasi dilakukan dengan menggunakan model uji berupa *square ducting*, pada bagian *inlet* terpasang *elbow* 90° dengan *damper* yang ditempatkan pada jarak $x/D_h=2$. Berikut adalah gambar geometri *square ducting* beserta penempatan posisi *damper* seperti pada gambar 2.5.

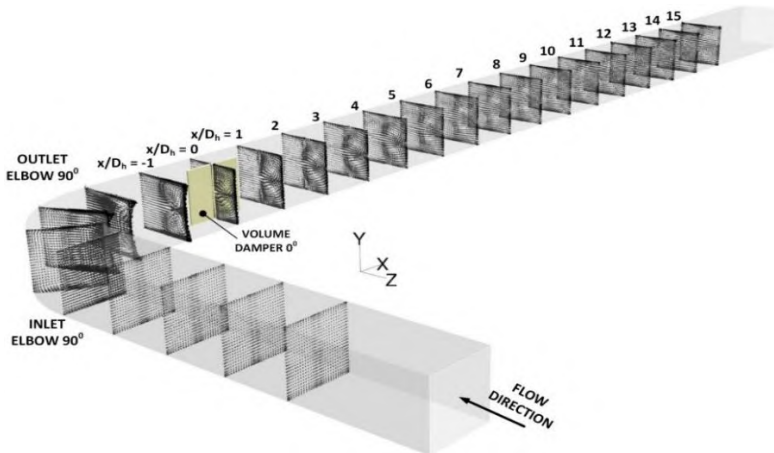


Gambar 2.5 Geometri square ducting (Putra, 2016)

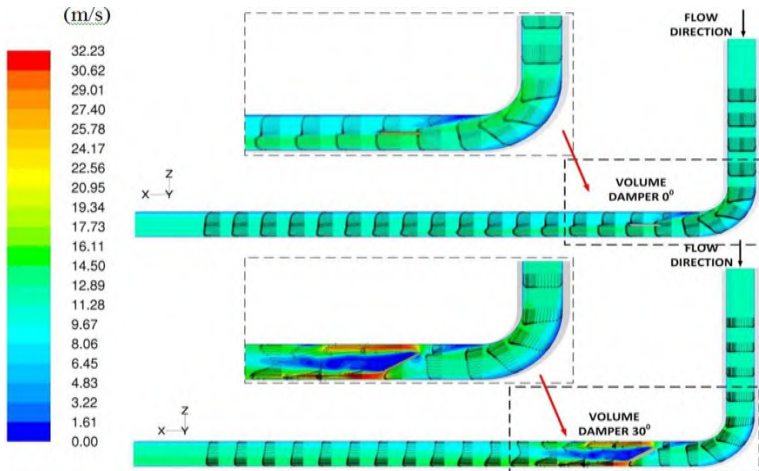
Geometri *ducting* dan penempatan *damper* yang diilustrasikan oleh gambar 2.5 memiliki spesifikasi pemodelan sebagai berikut:

- Bentuk Penampang : persegi
- Panjang *downstream straight channel* (L_o): 6000 mm
- Panjang *upstream straight channel* (L_i) : 1800 mm
- Tinggi dan lebar ($a \times b$) : 300×300 mm
- *Elbow Inner radius* (r_i) : 300 mm
- *Elbow Outer radius* (r_o) : 600 mm
- *Hydraulic diameter* (D_h) : 300 mm

Hasil penelitian yang diperoleh menyatakan bahwa proses *recovery* aliran dipengaruhi oleh sudut bukaan *damper*. Pada sudut bukaan *damper* 30° terjadi percepatan aliran pada daerah dekat sisi *outer wall* yang berakibat bertambahnya momentum aliran sehingga mempercepat proses *recovery* aliran dan aliran sekunder pada daerah dekat dinding dapat dikurangi. Pengambilan data berupa distribusi profil kecepatan dilakukan pada setiap posisi *cross-section*. Penempatan setiap *cross-section* dapat dilihat pada gambar 2.6.



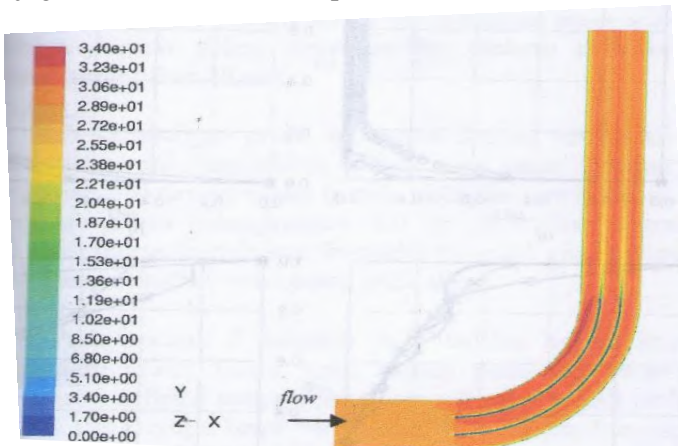
Gambar 2.6 Penempatan posisi *cross section* (Putra, 2016)



Gambar 2.7 Perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan sepanjang aliran untuk $Re=2.05 \times 10^5$ (Putra, 2016)

Adanya perlambatan aliran di daerah yang menghubungkan *upstream* dan *downstream* sesaat sebelum melalui *damper* untuk semua variasi sudut, daerah ini memiliki momentum yang rendah, tidak ada pengaruh yang signifikan pada variasi kecepatan terhadap

Iswati (2009) melakukan penelitian secara numerik dan eksperimen tentang profil kecepatan setelah melewati *elbow* 90°. Dari hasil penelitian yang dilakukan didapat hasil bahwa, dengan penambahan dua *guide vane* profil kecepatan pada sisi *outlet elbow* belum sepenuhnya bisa menjadi *uniform*. Diperlukan jarak tertentu dalam mengatur radius antar *guide vane*, agar profil aliran menjadi *uniform* kembali setelah suatu aliran melintasi *elbow*. Penambahan *guide vane* membuat profil kecepatan saat melintasi *elbow* sesaat *uniform*, namun setelah menuju *outlet elbow* keberadaan *guide vane* juga memberi efek terhadap karakteristik aliran.



Gambar 2.9 Kontur kecepatan di *midspan elbow* 90° dengan dua *guide vane* $Re_{Dh} = 1,2 \times 10^5$ (**Iswati, 2009**)

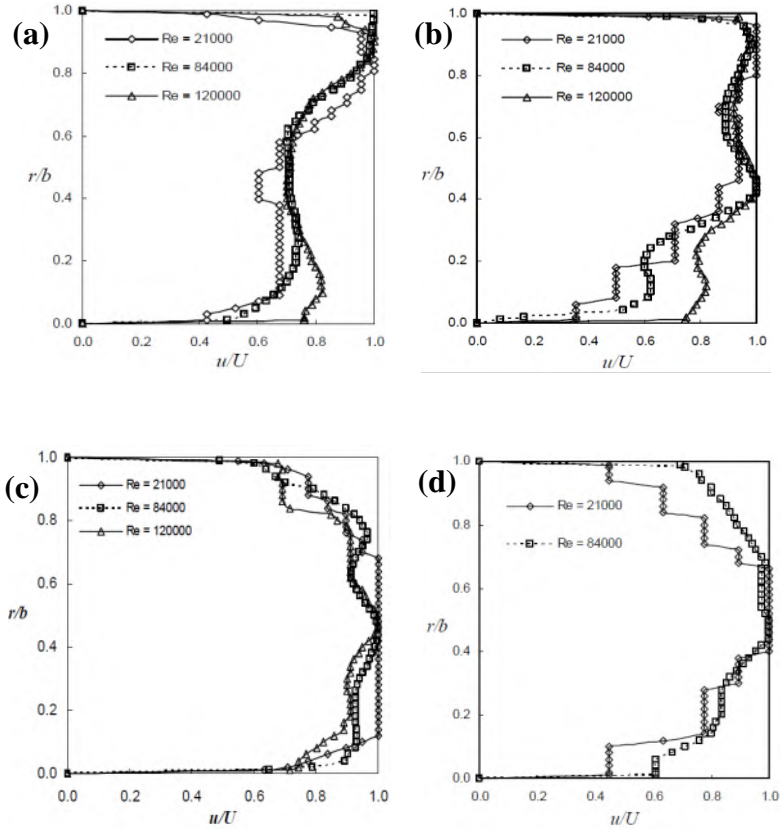
Sutardi dkk (2010) melakukan penelitian secara eksperimen pada sebuah *elbow*. *Elbow* yang digunakan berbentuk *rounded* dan *rectangular* dengan 4 variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane*, satu *guide vane*, dua *guide vane*, dan tiga *guide vane*. Bilangan *Reynolds* 2.1×10^4 , 8.4×10^4 dan 12×10^5 dijadikan sebagai variasi Re_{dh} aliran yang melalui *elbow*. Hasil yang diperoleh dari penelitian secara eksperimen adalah, penambahan *guide vane* mengurangi *pressure drop* pada Re_{dh} e terkecil sebesar 2.1×10^4 . Namun saat variasi Re_{dh} aliran 8.4×10^4 dan 12×10^5 didapat hasil yang berbanding terbalik, dimana terjadi

peningkatan *pressure drop* pada setiap penambahan *guide vane*. Selain itu, turbulansi aliran dapat dikurangi dengan penambahan *guide vane* pada setiap variasi Re_{dh} . Perbandingan data kuantitatif pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* dapat dijelaskan pada tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.2 Pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* (Sutardi dkk, 2010)

$Re_{,Dh}$	Number of Guide Vanes	Δp (N/m ²)	Δp (%)
21000	0	4.01	-
	1	2.67	-33.42%
	2	2.73	-31.92%
	3	2.71	-32.42%
84000	0	36.07	-
	1	37.40	3.69%
	2	51.12	41.72%
	3	74.59	106.79%
120000	0	79.11	-
	1	88.66	12.07%
	2	118.22	49.44%
	3	-	-

Sedangkan untuk profil kecepatan lokasi *downstream* pada *elbow* dengan 4 variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane*, satu *guide vane*, dua *guide vane*, dan tiga *guide vane* ditunjukkan pada gambar 2.10. Lokasi *downstream* adalah $3Dh$ dari ujung *guide vane*. Untuk semua konfigurasi *elbow*, tanpa *guide vane*, dengan satu, dua, atau tiga *guide vane*, profil kecepatannya dipengaruhi oleh nilai Re_{dh} . Profil kecepatan berkembang pada nilai Re_{dh} yang tinggi, hal ini disebabkan karena alirannya lebih turbulen.



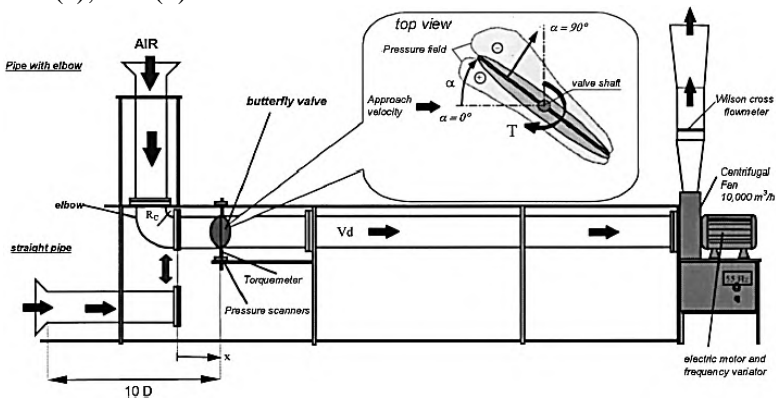
Gambar 2.10 Profil kecepatan pada *elbow* (a) tanpa *guide vane*, (b) 1 *guide vane*, (c) 2 *guide vane*, (d) 3 *guide vane* (Sutardi dkk, 2010)

Profil kecepatan *elbow* tanpa *guide vane* pada gambar 2.10 (a) saat $Re_{dh} 12 \times 10^5$ lebih berkembang dibandingkan saat $Re_{dh} 2,1 \times 10^4$ dan $8,4 \times 10^4$. Untuk *elbow* dengan satu *guide vane* pada gambar 2.12 (b) profil kecepataannya lebih berkembang daripada *elbow* tanpa *guide vane* dan profil kecepataannya juga berkembang seiring bertambahnya nilai Re_{dh} . Begitu juga pada *elbow* dengan tiga *guide vane* profil kecepataannya berkembang saat Re_{dh} tertinggi ($Re_{dh} = 8,4 \times 10^4$) seperti pada gambar 2.12 (d). Namun pada gambar

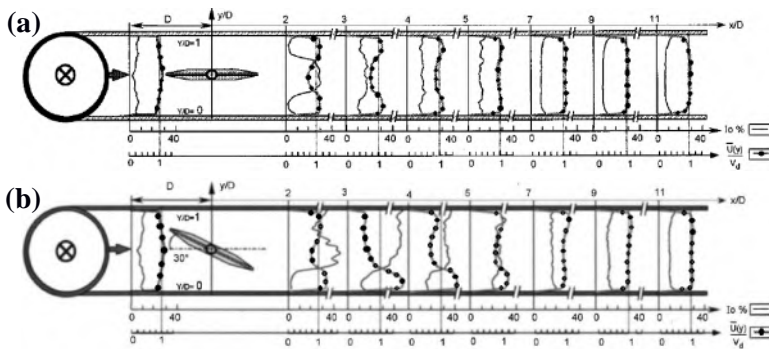
2.12 (c) untuk *elbow* dengan dua *guide vane* profil kecepatannya tidak berkembang pada Re_{dh} yang tertinggi ($Re_{dh}=12 \times 10^5$). Hal ini dikarenakan lokasi *downstream* pada 3Dh setelah *guide vane* profilnya jauh dari relaksasi.

2.10. Karakteristik Aliran Yang Melewati Saluran Dengan *Butterfly Valve* Sebagai Body Pengganggu

Danbon dan Sollicc (2000) melakukan eksperimen pada saluran berpenampang *circular* yang di dalamnya dipasang *butterfly valve* sebagai pengontrol laju aliran fluida, dengan memanfaatkan torsi yang dihasilkan oleh gaya-gaya aerodinamisnya akan membuka atau menutup seiring bertambah atau berkurangnya laju aliran massa. Eksperimen dilakukan pada kecepatan 40 m/s dan intensitas turbulen 2%, *valve* diletakkan di posisi $x/D=1$ dengan variasi $\alpha=0^\circ$ dan $\alpha=30^\circ$ serta bilangan *Reynolds* $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$, seperti yang terlihat pada gambar 2.11. Kemudian hasil yang diperoleh adalah profil kecepatan dan profil intensitas turbulen yang digambarkan berupa *dotlines* dan *solidlines*, seperti yang ditunjukkan berturut-turut pada gambar 2.12(a); 2.12(b).



Gambar 2.11 Test Section serta posisi valve $x/D=1$ dan sudut α .
(Danbon dan Sollicc, 2000)



Gambar 2.12 Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran dengan *elbow* (a) sudut $\alpha=0^\circ$ (b) sudut $\alpha=30^\circ$ (Danbon dan Sollic, 2000)

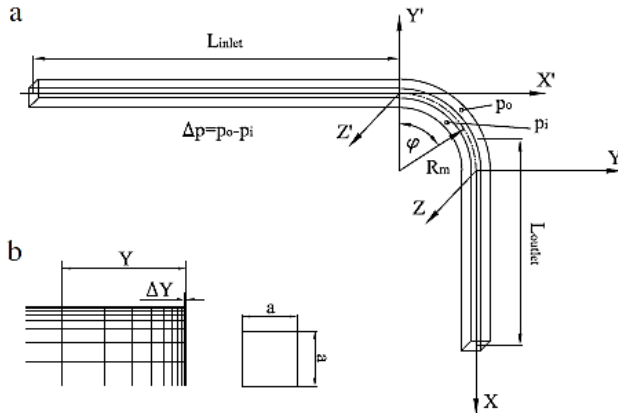
Ketika *valve* dipasang secara *fully open* ($\alpha=0^\circ$) dengan *elbow* seperti pada gambar 2.12(a) terlihat ada perubahan yang signifikan terhadap profil profil kecepatan sesaat setelah melalui *valve*, diketahui bahwa nilai $\frac{\bar{U}(y)}{V_d} < 1$ pada *centreline* ($y/D=0,5$) namun akan berangsur-angsur kembali *fully developed* pada $x/D=12$.

Sedangkan pada sudut kemiringan 30° dengan *elbow* (gambar 2.12(b)), aliran kembali *fully developed* pada $x/D=12$. Ini terjadi karena pada saluran yang terpasang *elbow* sudah mengalami gangguan akibat aliran sekunder di dalamnya, kemudian sesaat setelah melewati *elbow* terdapat *blockage effect* berupa *valve* sehingga seolah-olah gangguan tersebut terakumulasi akibatnya aliran tertunda mencapai *fully developed*. Secara keseluruhan, untuk aliran yang melalui *valve* bukaan 30° akan lebih cepat kembali normal dari pada *fully open*, disebabkan oleh *blockage effect* yang lebih besar akan memberikan momentum tambahan untuk melawan gaya gesernya.

2.11. Karakteristik Aliran Melalui *Rectangular Duct* Dengan *Elbow* 90°

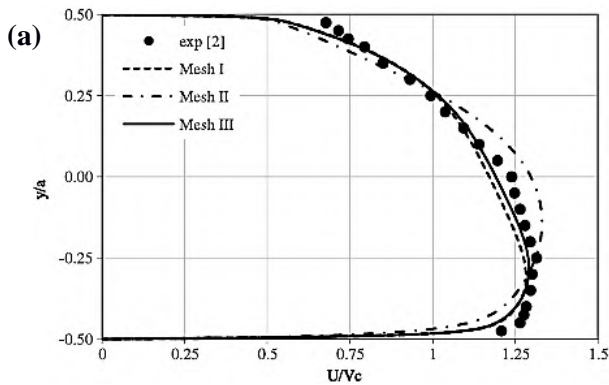
Analisa karakteristik aliran melalui *square duct* seperti yang dilakukan oleh Rup dan Sarna (2011) secara simulasi dan

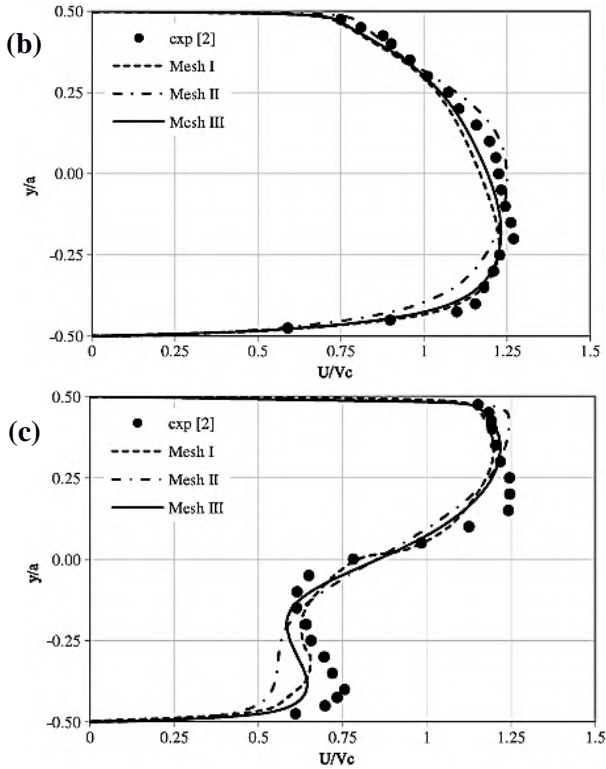
eksperimen. Simulasi menggunakan model turbulen *RSM* yang dilakukan pada $Re = 40000$ dengan geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm seperti yang terlihat pada gambar 2.13. Variasi dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, dan $V_k = 1034\ 775$



Gambar 2.13 (a) Penentuan geometri pada domain uji (b) *Mesh* pada Volume (**Rup dan Sarna, 2011**)

Hasil yang didapatkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*.

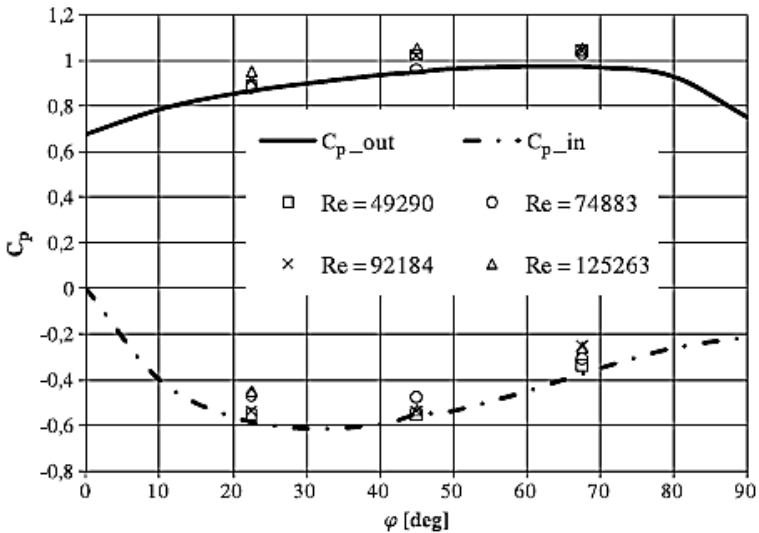




Gambar 2.14 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen (a) $\phi = 30^\circ$ ($z/D_h = 0.0$); (b) $\phi = 60^\circ$ ($z/D_h = 0.0$); (c) Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ and $z/D_h = 0.0$.

(Rup dan Sarna, 2011)

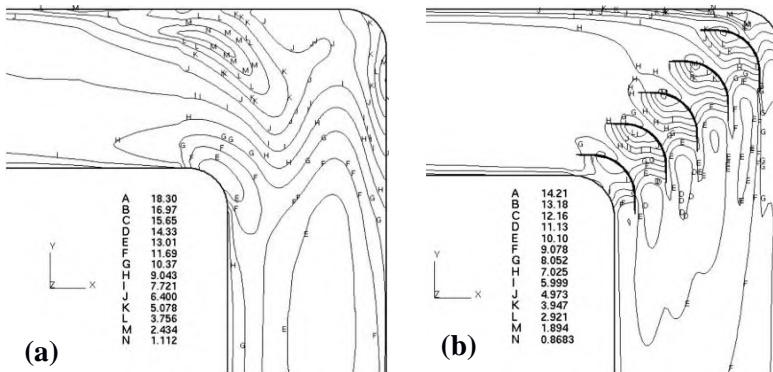
Pada gambar 2.14(a) dan 2.14(b), mendeskripsikan bahwa hasil yang didapat dari simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada lokasi $\phi = 30^\circ$ dan $\phi = 60^\circ$. Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.14(c) yang menunjukkan profil kecepatan pada dengan lokasi $x/D_h = 1.0$ and $z/D_h = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($V_k = 1034\ 775$).



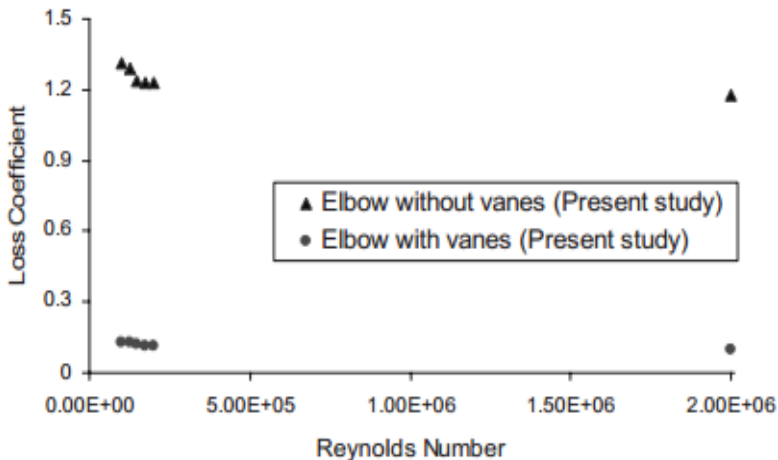
Gambar 2.15. Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen.
(Rup dan Sarna, 2011)

Gambar 2.15 memberikan informasi tentang distribusi koefisien tekanan pada *elbow* yang, dapat diamati bahwa koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$). Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar koefisien *losses* pada *elbow* tersebut.

Simulasi numerik dengan perangkat lunak STAR-CD dilakukan oleh Moujaes & Aekula (2009) yang mengevaluasi perbedaan *pressure drop* pada *elbow* dengan dan tanpa *guide vane* berpenampang *rectangular* pada berbagai variasi bilangan *Reynolds*. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan tiga belas bilangan *Reynolds* pada rentang $1 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$. Pada gambar 2.16 ditunjukkan perbandingan besar tekanan aliran saat melintasi *elbow* dengan *guide vane* dan menggunakan *guide vane* yang ditunjukkan sebagai berikut.



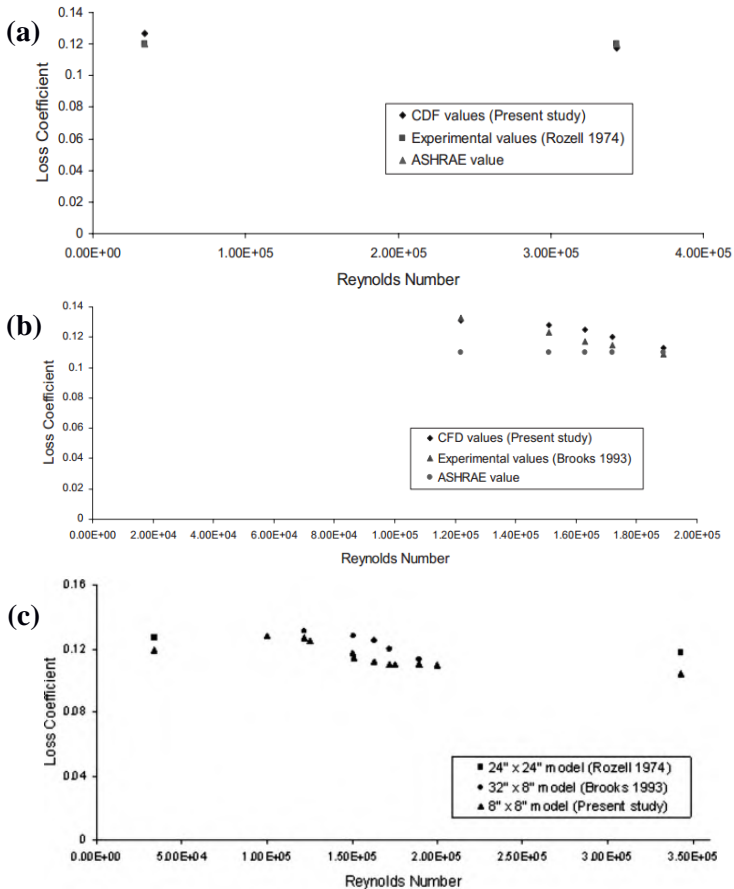
Gambar 2.16 Perbandingan *velocity magnitude*(m/s) *midplane* pada bilangan *Reynolds* $1,50 \times 10^5$ dengan penampang 0,2 m x 0,2 m untuk : a) tanpa *vane* ; b) dengan *vane* (Moujaes & Akeula, 2009)



Gambar 2.17 Perbandingan *loss coefficient* antara saluran tanpa *vane* dan dengan *vane* terhadap bilangan *Reynolds* 3×10^4 hingga 2×10^6 (Moujaes & Akeula, 2009)

Dari perbandingan diatas akan didapat perbandingan *loss coefficient* antara hasil simulasi numerik yang dilakukannya dengan hasil eksperimen dari **Rozell (1974)** dan **Brooks (1993)**,

menunjukkan kesesuaian antara hasil keduanya yang disampaikan pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Perbandingan *loss coefficient* saluran untuk : a) 0,6 m x 0,6 m *duct elbow* dengan *vanes* ; b) 0,81 m x 0,2 m *duct elbow* dengan *vanes* ; c) perbandingan ketiga pemodelan CFD dengan *vanes* (Moujaes & Akeula, 2009)

2.12. Kondisi Aliran Dekat Dinding

Pengkondisian jenis aliran dekat dinding dapat didefinisikan dengan nilai y^+ . y^+ adalah suatu parameter tak berdimensi untuk menyatakan kondisi aliran yang dibatasi oleh dinding, dimana nilai y^+ dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut.

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad (2.6)$$

Dimana u_* adalah kecepatan gesekan aliran pada dinding terdekat, y adalah jarak menuju dinding terdekat, ν adalah viskositas kinematik lokal fluida. Nilai y^+ sering digunakan pada teori boundary layer untuk mendefinisikan hukum *law of the wall*. Kecepatan gesekan aliran pada dinding terdekat dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.7)$$

Dimana τ_w adalah tegangan geser aliran pada dinding, dan ρ adalah massa jenis fluida.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan untuk meneliti bentuk aliran di dalam *square ducting* secara numerik dibahas dalam bab ini. Metode penelitian ini menggunakan piranti lunak simulasi *CFD* komersil untuk menganalisis karakteristik aliran tiga dimensi dalam *square duct* dimana dalam *elbow* 90° ditempatkan dua *guide vane*, serta *damper* dengan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 30° searah jarum jam, dan 30° berlawanan jarum jam yang terletak pada daerah *downstream straight duct* setelah *elbow* $x/D_h=2$ dan besar kecepatan pada sisi inlet 10 m/s. Berikut metodologi pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi yang dilakukan untuk mencari berbagai sumber yang terkait dengan tema penelitian, dengan mengumpulkan beberapa informasi baik dari artikel ilmiah, jurnal, *text book*, dan hasil penelitian sebelumnya.

2. Simulasi

Penelitian ini menitikberatkan pada penggunaan piranti lunak simulasi *CFD* komersial untuk mengetahui fenomena aliran tiga dimensi pada daerah *downstream straight duct*. Pada tahap ini, terdiri dari tiga tahap yakni, *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

3. Penyusunan Laporan

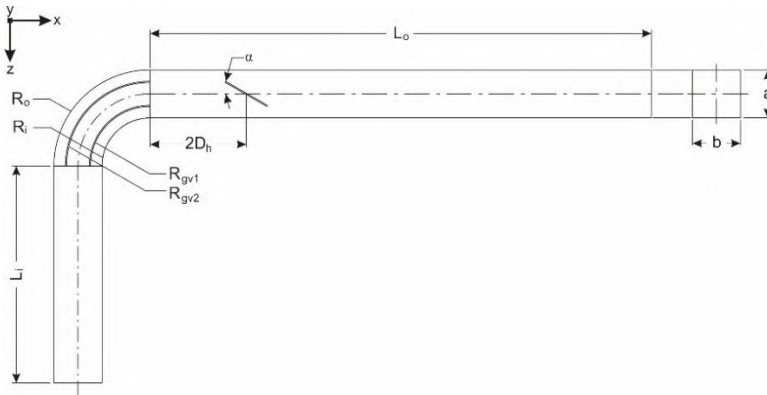
Laporan ini tersusun atas pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, analisis dari hasil simulasi, kesimpulan dan saran dalam pelaksanaan simulasi yang telah dilakukan.

3.1 Geometri Ducting

Ducting pada penelitian secara numerik ini memiliki bentuk penampang persegi (*square*), dan pada bagian *upstream straight duct* terhubung dengan saluran belok berupa *elbow* 90° yang berpenampang *square* dengan ditempatkan *double guide vane*

di dalamnya, kemudian terpasang juga bodi pengganggu berupa *damper* yang terletak pada jarak $x/D_h = 2$ setelah *elbow* 90° . Geometri *ducting* serta penempatan bodi pengganggu berupa *guide vane* dan *damper* diilustrasikan pada gambar 3.1. Spesifikasi dari geometri model uji untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bentuk Penampang : Persegi/square
- Panjang *upstream straight duct* (L_i) : 750 mm
- Panjang *downstream straight duct* (L_o) : 2250 mm
- Tinggi dan lebar *damper* ($a \times b$) : 125 x 125 mm
- *Elbow Inner radius* (r_i) : 125 mm
- *Elbow Outer radius* (r_o) : 250 mm
- *Guide Vane inner radius* (r_{gv1}) : 156.25 mm
- *Guide Vane outer radius* (r_{gv2}) : 218.75 mm
- Tebal *guide vane* dan *damper* : 3 mm



Gambar 3.1. Geometri *Ducting*

3.2 Metode Numerik

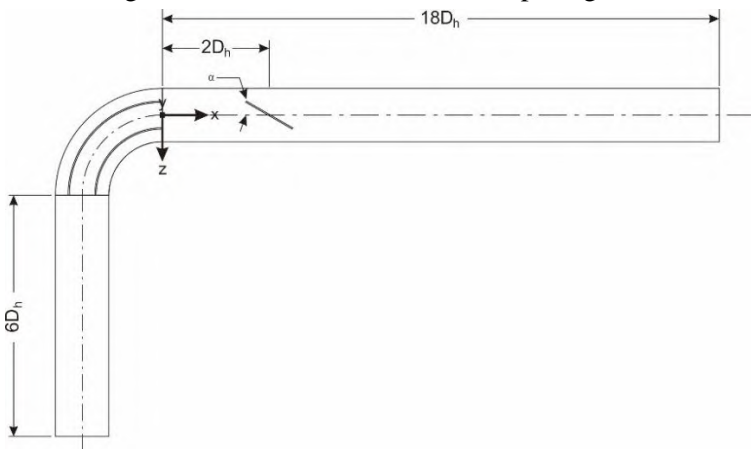
Penelitian ini menggunakan piranti lunak simulasi komputasi fluida komersial untuk melakukan pendekatan secara numerik dan membuat geometri model, serta melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model uji. Secara umum, urutan metode yang dilakukan pada penelitian numerik dibagi menjadi dua tahap,

yaitu tahap *pre-processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

3.2.1 Tahap Pre-Processing

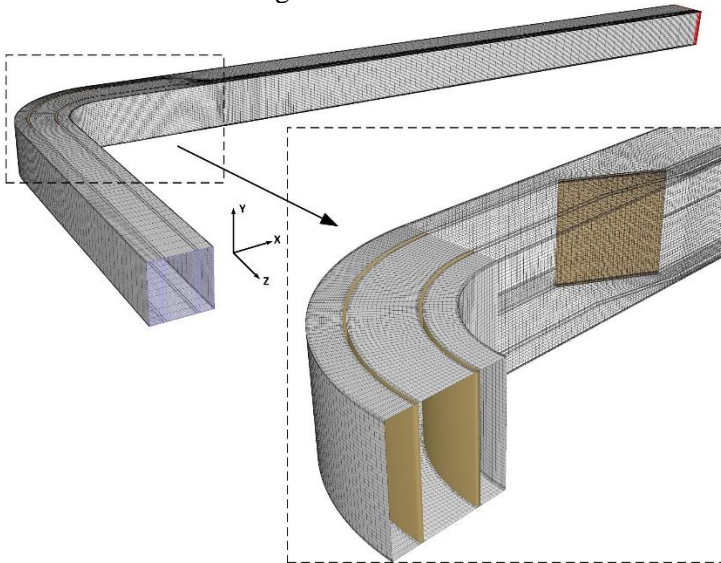
Pre-processing merupakan tahapan pertama dalam membangun dan menganalisis sebuah model komputasi. Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan, antara lain: pembuatan geometri, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan. Penjelasan sub-tahapan *preprocessing* adalah sebagai berikut :

1. Membuat model tiga dimensi dengan acuan geometri yang diilustrasikan pada gambar 3.1. Pembuatan model uji dilakukan pada perangkat lunak *GAMBIT* 2.4.6, dimana pemodelan dibuat dalam bilangan tidak berdimensi. Model *ducting* dibuat dalam variasi sudut kemiringan *damper* pada sudut sebesar 0° , 30° CW, dan 30° CCW. Dalam penelitian ini, dilakukan penambahan *elbow* 90° dengan *double guide vane*, penambahan ini dimaksudkan untuk mendefinisikan profil kecepatan telah terpengaruh oleh adanya bodi pengganggu berupa *double guide vane* didalam *elbow* 90° sebelum melewati *damper*. Pemodelan model uji pada bilangan tak berdimensi diilustrasikan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Model Geometri *Square Ducting*

2. Pembuatan *meshing* dilakukan dengan menempatkan dua *guide vane* pada *square elbow* tanpa adanya *damper*, kemudian *meshing* dengan menempatkan 2 *guide vane* pada *square elbow* serta penambahan *damper* dengan setiap variasi sudut kemiringan *damper*. *Meshing* dilakukan dengan membagi volume menjadi 3 bagian, yaitu *upstream straight duct*, *elbow 90°*, dan *downstream straight duct*. *Meshing* volume yang digunakan dengan tipe *Hexahedral-map*. Metode *meshing* yang digunakan adalah *grading* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada semua dinding. Hal ini dilakukan sebagai efek adanya *wall function*. Hasil dari pembuatan *mesh* pada model uji diilustrasikan oleh gambar 3.3.



Gambar 3.3. *Mesh* pada *Ducting*

3. Dalam setiap pemodelan numerik selalu diperlukan analisa dimensi untuk mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh terhadap hasil pemodelan yang telah dilakukan. Pada pemodelan rectangular ducting ini, parameter-

parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran fluida pada model uji ini adalah massa jenis fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan fluida (U), intensitas turbulensi (TI) dan diameter hidrostatis (D_h). Berikut ini merupakan langkah-langkah pemodelan numerik menggunakan *software Fluent 6.3.26* :

- *Grid*

Langkah pertama yang dilakukan pada *software* simulasi CFD komersial adalah memasukkan hasil *grid* yang telah dibuat untuk pembacaan data hasil *meshing*. Kemudian dilakukan *grid checking*. Setelah itu skala ditentukan dalam satuan m.

- *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran yang akan disimulasikan, meliputi pemilihan model *solver pressure based, steady* dan menggunakan model turbulen *k- ϵ Realizable* berdasarkan penelitian **Nur Ikhwan** (2009).

- *Materials*

Pada tahap ini dilakukan penentuan sifat fisik material. Pada *form material* dimasukkan data *properties* material fluida yaitu udara pada temperatur 28 °C dengan *density* (ρ) 1,172 kg/m³ dan *viskositas absolute* (μ) 1,8586 x 10⁻⁵ N.s/m².

- *Operating Conditions*

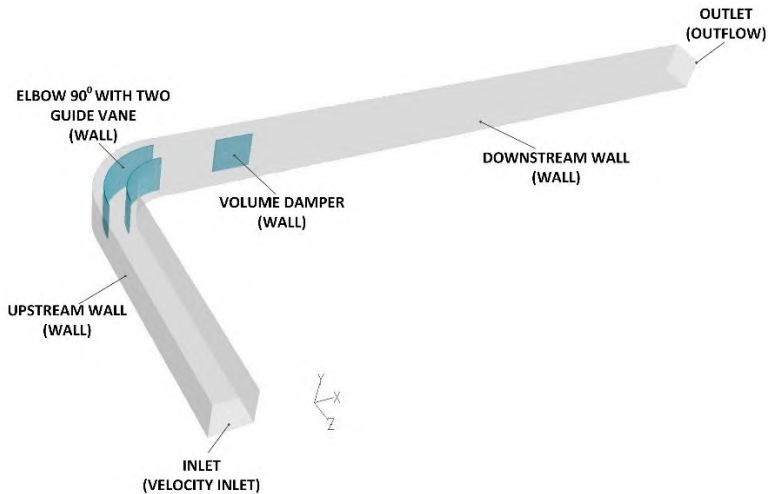
Pada tahap ini dilakukan penentuan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar 101325 pa.

- *Boundary Conditions*

Pada tahap ini dilakukan penentuan parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji. Daerah *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dalam m/s dan *outlet* didefinisikan sebagai *outflow*. Untuk kondisi batas *upstream* dan *downstream* serta *double*

guide vane dan *volume damper* didefinisikan sebagai *wall*, seperti yang tertera pada gambar 3.4. *Inlet* yang dimaksud berupa kondisi awal mula fluida memasuki *upstream*, pada bagian ini *velocity inlet* diatur pada 10 m/s serta *turbulence intensity* diatur pada 5%. Pemodelan dari *wall* didefinisikan sebagai *stationary wall*, *stationary wall* menandakan *wall* dalam keadaan diam. Domain pemodelan *ducting* dapat diilustrasikan pada gambar 3.4.

- *Solution*
Solution pada pemodelan ini menggunakan SIMPLE dan menggunakan *discretization second order* untuk *pressure*, sedangkan *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*.
- *Initialize*
 Merupakan langkah awal untuk proses iterasi agar mudah mencapai konvergen, langkah ini dapat dihitung dari *inlet*, *outlet*, atau zona lainnya. Dalam kasus ini langkah awal dimulai dari sisi *inlet*.
- *Monitor Residual*
 Pada proses iterasi berlangsung harga kriteria konvergensi ditentukan agar proses iterasi tidak berlangsung terlalu lama. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-6} untuk *continuity*, *x-velocity*, *y-velocity*, *z-velocity*, *k* dan ε . Hal tersebut berarti proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga lebih kecil dari harga yang telah ditentukan.
- *Iterate*
 Langkah kelanjutan setelah penetapan harga *monitor residual* adalah *iterate*, yang merupakan langkah perhitungan pada piranti lunak simulasi CFD komersial. Pada tahap ini dilakukan iterasi hingga tercapai harga *convergence criterion* yang telah ditentukan



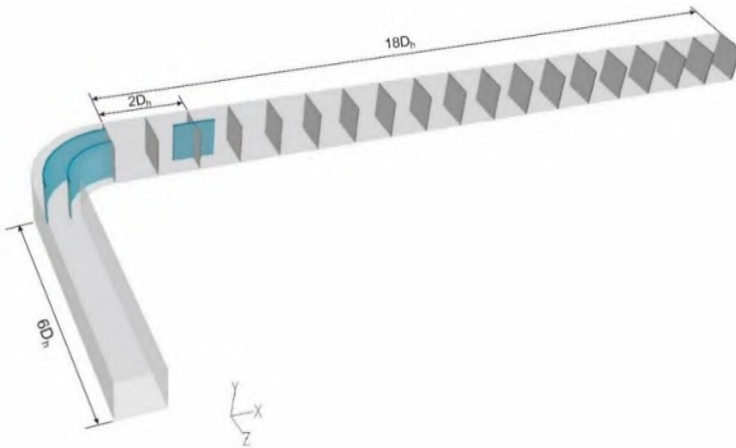
Gambar 3.4 Domain pemodelan dari *Square Ducting*

3.2.2 Tahap *Processing* Menggunakan Piranti Lunak Simulasi CFD Komersial

Pada tahap ini penyelesaian pemodelan dilakukan dengan bantuan piranti lunak simulasi CFD komersial berupa *Fluent 6.3.26*. Kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada saat tahap *pre-processing* akan dihitung (diiterasi). Jika kriteria konvergensi tercapai, dimana kriteria konvergensi yang ditetapkan untuk melakukan penyelesaian adalah 10^{-6} untuk *continuity*, *x-velocity*, *y-velocity*, *z-velocity*, k dan ϵ ,

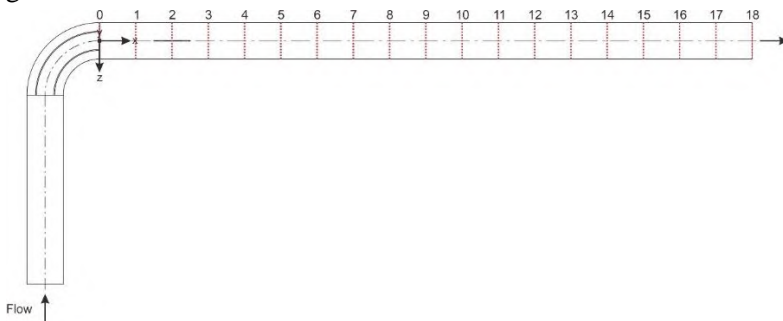
Setelah tercapai konvergen pada setiap model uji maka tahapan penelitian dilanjutkan pada langkah *postprocessing*. Jika tidak tercapai, maka tahapan akan mundur ke langkah awal dan dilakukan langkah untuk memperbaiki pembuatan *meshing*.

3.2.3 Posisi Pengambilan Data Pada *Domain Benda Uji*



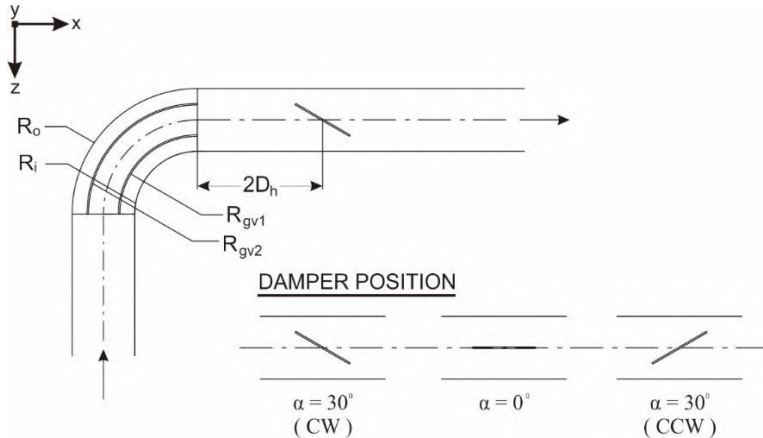
Gambar 3.5 Posisi pengambilan data di sepanjang *downstream*

Gambar 3.5. menunjukkan posisi pengambilan data berupa profil kecepatan dan intensitas turbulen pada daerah sepanjang *downstream*. Referensi nol pada daerah *downstream* terletak pada sisi *outlet* dari *elbow* 90°. Posisi pengambilan data yang dilakukan di daerah sepanjang *downstream* dimulai dari outlet *elbow* yaitu $x=0$ s/d $x/D_h=18$. Penomoran tiap *cross-section* dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Penomoran posisi tiap *cross-section* di sepanjang *downstream*

Pengambilan data di setiap *cross-section* dilakukan berdasarkan variasi sudut bukaan damper, data diambil saat damper $\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$ *clockwise* (CW), dan $\alpha = 30^\circ$ *counter clockwise* (CCW). Gambar 3.7 menunjukkan variasi sudut bukaan damper pada model uji *square duct*.



Gambar 3.7 Variasi sudut bukaan damper pada *square ducting*

3.2.4. Tahap *Post-Processing* Menggunakan Piranti Lunak Simulasi CFD Komersial

Post-processing merupakan tahapan dimana terdapat penampilan hasil setelah dilakukan iterasi. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa grafik profil kecepatan pada daerah sepanjang *downstream* dan *pressure drop* pada *ducting*. Data kualitatif berupa penampilan *velocity vector* pada setiap *cross-section* dan penampilan kontur kecepatan pada *centerline square ducting*.

3.3. Langkah-Langkah Penelitian

Secara singkat prosedur penelitian numerik pada *square duct* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan tabel langkah-langkah penelitian yang ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Urutan langkah penelitian

Urutan Proses Studi Numerik Menggunakan Perangkat Lunak CFD komersil
Melakukan pembuatan geometri <i>ducting</i> .
Memodelkan <i>ducting</i> dengan menggunakan piranti lunak simulasi CFD komersil.
Membuat <i>meshing</i> pada <i>ducting</i> , dengan metode pembuatan <i>meshing</i> berupa <i>grading mesh</i> . Menggunakan <i>mesh</i> tipe <i>Hexa-hedral map</i> .
Menentukan kualitas <i>mesh</i> dengan acuan <i>Equiangle skewness</i> 0 – 0,4 , bila belum sesuai maka proses pembuatan <i>meshing</i> diulangi lagi.
Menentukan <i>boundary condition</i> pada model uji, serta batasan yang digunakan dalam penyelesaian simulasi.
Menentukan batas operasi dalam simulasi model uji, meliputi : <i>Models</i> , <i>Materials</i> , <i>Boundary Condition</i> , <i>Solution</i> , <i>Initialize</i> , <i>Monitor Residual</i> , dan <i>Iterate</i> yang dilakukan pada piranti lunak simulasi CFD komersil.
Melakukan Iterasi hingga mencapai konvergen, bila simulasi belum konvergen, maka pembuatan <i>mesh</i> pada model uji diulangi lagi.
Setelah konvergen dilakukan analisa grid independency. Analisa <i>grid independency</i> divariasikan sebanyak 5 variasi jumlah <i>mesh</i> .
Melakukan simulasi pada model uji dengan variasi yang ditentukan yaitu; model uji 2 <i>guide vane</i> tanpa <i>damper</i> , model uji 2 <i>guide vane</i> sudut bukaan <i>damper</i> 0°, model uji 2 <i>guide vane</i> sudut bukaan <i>damper</i> 30° <i>clockwise</i> (CW), dan model uji 2 <i>guide vane</i> sudut bukaan <i>damper</i> 30° <i>counter clockwise</i> (CCW).
Melakukan <i>Post-processing</i> setelah dilakukan analisa <i>grid independency</i> .
Analisa hasil dan penarikan kesimpulan

3.4 Analisa *Grid Independency*

Dari beberapa hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak CFD komersial, telah dilakukan variasi mesh pada ducting. Variasi kerapatan *mesh* untuk analisa *grid independency* pada model uji *square duct* dan *square elbow* dengan variasi sudut bukaan *damper* $\alpha=0^\circ$ dipaparkan dalam tabel 3.1 dan 3.2. Hasil analisa *grid independency* untuk model turbulen *k- ϵ Realizable (rke)* dapat dilihat pada table 3.1, dimana data yang disajikan berupa perbandingan variasi *mesh* yang ditinjau dari nilai *y plus* (y^+).

Tabel 3.2 *Grid independency* ditinjau dari y^+

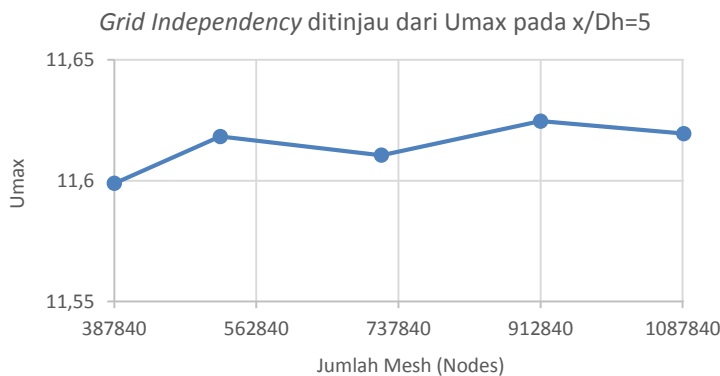
Jenis Mesh	Jumlah Mesh (Nodes)	Jumlah Mesh (Cells)	y^+ max (total)
Mesh A	387840	365025	59,969
Mesh B	518400	488963	42,204
Mesh C	716832	681695	41,592
Mesh D	912912	870647	32,079
Mesh E	1089280	1042899	33,237

Jika dilihat dari tabel 3.2, nilai y^+ semakin kecil menunjukkan bahwa aliran yang terjadi dalam *ducting* akan semakin turbulen. Dari variasi *mesh* yang dilakukan maka dipilih variasi *mesh* dengan nilai y^+ paling kecil, dimana nilai y^+ paling kecil yaitu pada variasi *mesh* D. Selain melakukan peninjauan terhadap nilai y^+ , analisa *grid independency* juga dilakukan untuk meninjau kecepatan lokal maksimal pada setiap variasi kerapatan *mesh*.

Peninjauan kecepatan lokal maksimal dilakukan pada posisi *cross-section* $x/D_h=5$. Nilai kecepatan lokal maksimal *mesh* B dijadikan sebagai referensi untuk mencari penyimpangan data terhadap lima variasi *mesh*. Tabel 3.2 menunjukkan perbandingan tiap variasi *mesh* yang dilakukan terhadap nilai kecepatan lokal maksimal. Penentuan error mengacu pada mesh 518400 dengan $U_{max}=11,61829$ m/s.

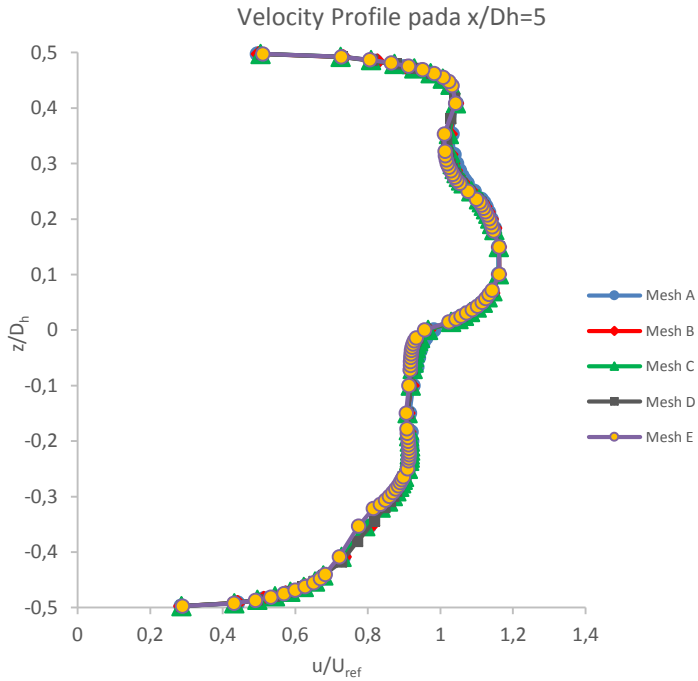
Tabel 3.3 *Grid independency* ditinjau dari U_{max} pada *cross section* $x/D_h=5$

Jenis Mesh	Jumlah Mesh(Nodes)	U_{max} (m/s)	Error (%)
Mesh A	387840	11,598882	-16,7
Mesh B	518400	11,618298	-
Mesh C	716832	11,610538	-6,7
Mesh D	912912	11,624619	5,4
Mesh E	1089280	11,619479	1



Gambar 3.8 Grafik *grid independency* ditinjau dari U_{max} pada $x/D_h=5$

Dari pengertian *grid independency*, hasil dari variasi kerapatan mesh yang mengindikasikan tidak terdapat perubahan secara signifikan pada jumlah mesh yang dibuat yaitu variasi *mesh C*. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 3.8, dimana posisi *mesh C* terhadap *mesh D* dan *mesh B* tidak terjadi perubahan yang signifikan. Kemudian dari error yang dihasilkan dengan mengacu nilai *mesh A*, nilai eror *mesh C* merupakan yang paling kecil dari variasi mesh yang lain. Bentuk profil kecepatan pada $x/D_h=5$ pada setiap variasi mesh dipaparkan dalam gambar 3.9.



Gambar 3.9 Perbandingan *velocity profile* pada $x/D_h=5$ terhadap variasi kerapatan *mesh*

Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Hasil studi numerik ditampilkan secara kuantitatif dan kualitatif. Data secara kuantitatif ditampilkan berupa grafik *velocity profile* pada *cross-section* tertentu dan data *pressure drop* yang ditampilkan dalam tabel. Sedangkan data secara kualitatif ditampilkan berupa kontur kecepatan sepanjang *ducting* dan vektor kecepatan pada *cross-section* tertentu.

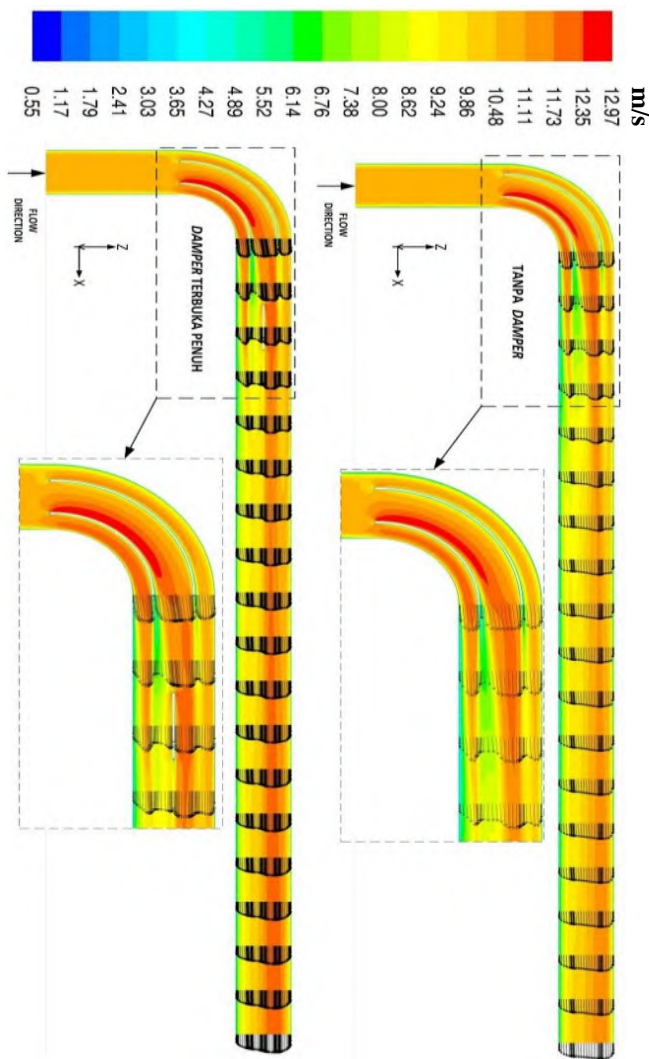
Pembahasan dilakukan pada *ducting* tanpa *damper*, kemudian *ducting* dengan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 30° CW dan 30° CCW dengan kecepatan fluida sebesar 10m/s pada setiap variasi *ducting*. Hasil penelitian dibahas dalam beberapa bab.

4.1 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan *Ducting* Pada Setiap Variasi

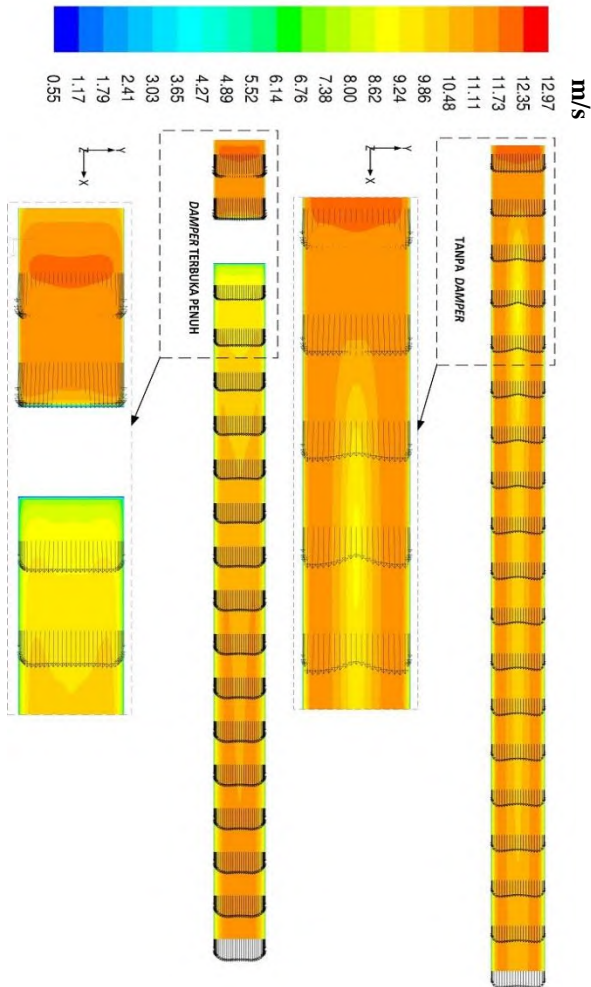
Data kualitatif yang ditampilkan berupa visualisasi kontur kecepatan sepanjang *ducting* pada bidang horizontal dan bidang vertikal. Sedangkan data kuantitatif, berupa grafik *velocity profile* pada *cross-section* tertentu disepanjang *downstream*. Berikut data kualitatif dan kuantitatif pada setiap variasi model uji *ducting* yang akan dijelaskan dalam beberapa bagian dari sub-bab.

4.1.1 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan *Ducting* Tanpa *Damper* Dengan *Ducting* Pada Sudut Bukaan *Damper* 0° Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

Bentuk profil kecepatan fluida kerja pada *ducting*, dipengaruhi oleh penempatan 2 *guide vane* di dalam *elbow* dan dipengaruhi oleh adanya sudut bukaan *damper*. Distribusi kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}) dimana u adalah kecepatan lokal pada satu titik dalam suatu *section* dan U_{ref} merupakan kecepatan udara masuk pada *ducting* yang telah ditentukan sebesar 10m/s. Berikut perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran, baik secara horizontal dan vertikal pada setiap *cross-section* ditampilkan pada gambar 4.1 dan gambar 4.2.



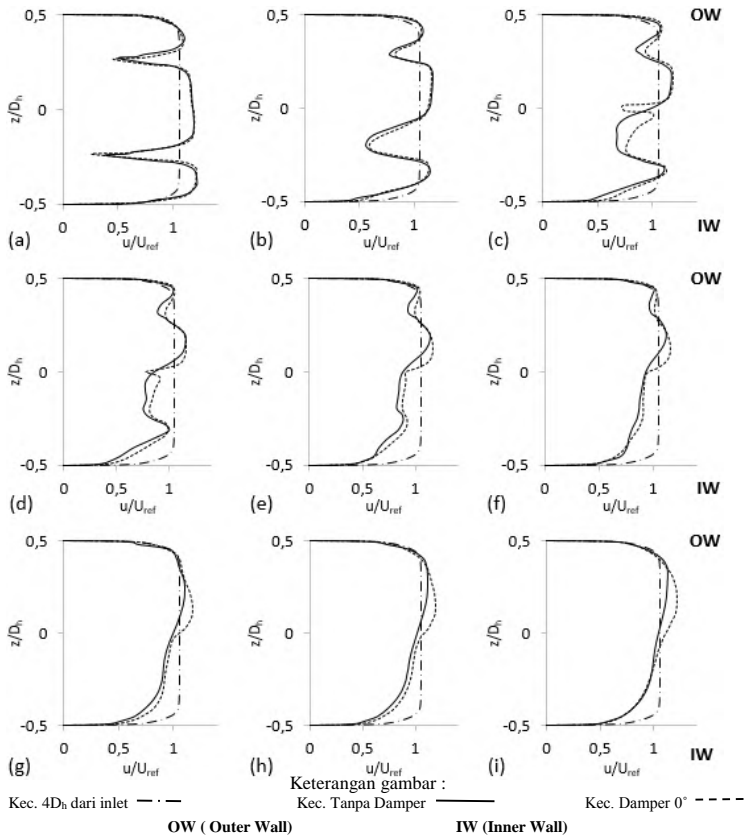
Gambar 4.1 Perbandingan perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan aliran antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° bidang horizontal.



Gambar 4.2 Perbandingan perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan aliran antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° bidang vertikal.

Secara garis besar, bentuk profil kecepatan disepanjang *downstream straight duct* antara kedua variasi tidak tampak

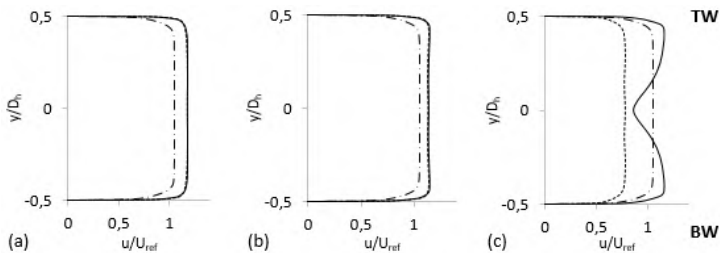
perubahan yang signifikan. Hasil studi numerik pada *cross-section* yang pertama yaitu pada *section* di *outlet elbow*, menunjukkan bahwa pada bidang horizontal tidak menunjukkan adanya *backflow* di daerah *inner wall* dan hal ini juga terjadi pada bidang vertikal. Hal ini dikuatkan dengan gradasi warna yang ditunjukkan oleh kontur kecepatan, dimana pada *section* tersebut hanya terdapat penurunan kecepatan tanpa adanya *backflow* pada daerah *inner*.

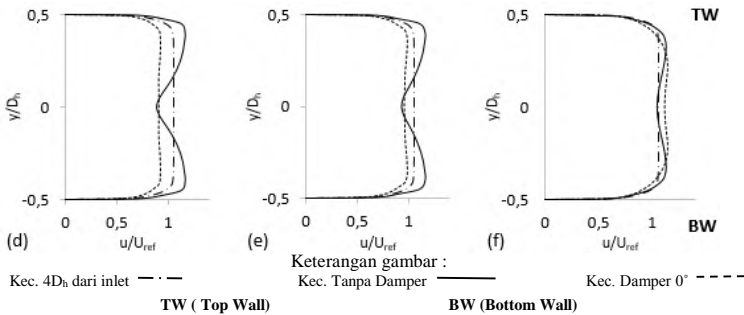


Gambar 4.3 Perbandingan grafik *velocity profile* secara horizontal antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h :
 a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ;g) 9 ; h) 13 ; i) 18

Pada bidang horizontal, absis grafik profil kecepatan menunjukkan z/D_h dimana nilai $z/D_h = -0,5$ merupakan sisi *inner ducting* dan $z/D_h = 0,5$ merupakan sisi *outer ducting*. Sedangkan pada bidang vertikal, absis grafik profil kecepatan menunjukkan y/D_h dimana nilai $y/D_h = -0,5$ merupakan sisi atas *ducting* dan $z/D_h = 0,5$ merupakan sisi bawah *ducting*. Kemudian ordinat grafik profil kecepatan adalah nilai dari u/U_{ref} , dimana $u/U_{ref} = 1$ menunjukkan bahwa kecepatan lokal pada *section* tersebut sama dengan kecepatan referensi. Sumbu x grafik profil kecepatan baik pada bidang horizontal dan bidang vertikal adalah nilai dari u/U_{ref} . Agar lebih detail, maka dipaparkan dalam grafik perbandingan profil kecepatan antara *ducting* tanpa damper dan *ducting* dengan sudut bukaan damper 0° .

Bentuk profil kecepatan dilihat pada bidang horizontal antara *ducting* tanpa damper dengan *ducting* pada sudut bukaan damper 0° hampir serupa hingga aliran berada pada *cross-section* 3, dimana *cross section* 2 berada pada $x/D_h = 1$. Pada *section* 3 bidang horizontal terdapat sedikit perbedaan yaitu pada $z/D_h = 0,5$, dimana pada posisi tersebut terdapat damper. Sehingga pada posisi sumbu y grafik yang sama, akan menunjukkan bahwa kecepatan aliran pada *ducting* tanpa damper akan lebih tinggi daripada *ducting* dengan sudut bukaan damper 0° . Hingga pada $x/D_h = 13$ hingga $x/D_h = 18$, profil kecepatan masih terdapat perbedaan namun tidak terlalu signifikan saat aliran berada pada $x/D_h = 3$ hingga $x/D_h = 11$. Kedua aliran ini masih belum mengalami *recovery* aliran, karena masih terdapat kecepatan yang melebihi kecepatan referensi pada *outter wall*. Ini terjadi hingga $x/D_h = 18$.





Gambar 4.4 Perbandingan grafik *velocity profile* secara vertikal antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 3 ; d) 4 ; e) 5 ; f) 18

Dari bidang vertikal, terdapat perbedaan aliran di daerah sekitar $y/D_h=0$ pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0°. Hal ini disebabkan oleh tidak mempunyai aliran untuk mengikuti kontur bodi sehingga terjadi separasi aliran setelah meninggalkan *damper* dan pada *section 7* hingga *section 19* terdapat sedikit keterlambatan aliran. Dari kedua variasi ini, bentuk profil kecepatan masih belum mampu *recovery* hingga *section 19*. Namun aliran pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0°, hampir sama dengan aliran yang sudah *recovery*. Hal ini juga ditunjukkan dengan gradasi warna pada kontur kecepatan. Hal ini juga ditunjukkan dengan gradasi warna pada kontur *velocity*, dimana warna aliran setelah melewati *damper* cenderung menuju gradasi warna lebih terang dari warna kecepatan referensi.

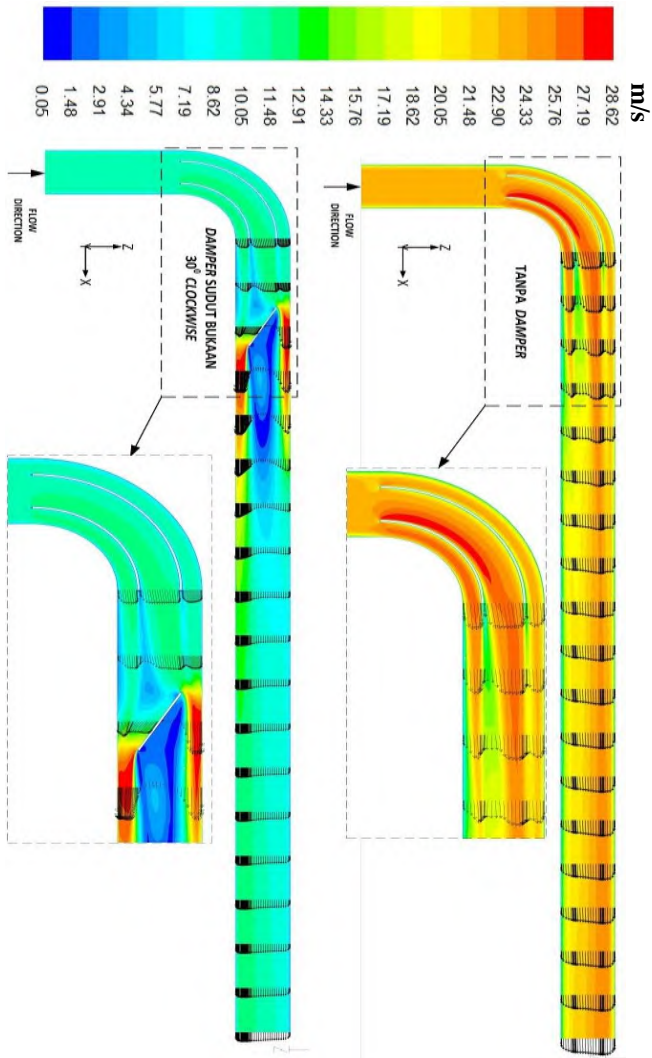
Dari penjelasan data pada paragraf sebelumnya, dapat dianalisis bahwa penambahan *guide vane* pada *ducting* dapat mengurangi *separation loss* yang terjadi pada *outlet elbow*. Analisa ini dikuatkan dengan tidak adanya *backflow* di daerah *elbow* pada profil kecepatan pada $x=0$. Serta gradasi dari kontur kecepatan yang menunjukkan bahwa pembagian aliran dengan adanya *guide vane* mampu mengurangi *separation loss*, sehingga aliran yang kekurangan momentum akibat adanya perbedaan tekanan pada *inner wall* dan *outer wall* mampu diatasi dengan adanya *double*

guide vane pada *elbow*. Profil kecepatan setelah melewati *elbow*, pada sisi *inner* lebih besar daripada sisi *outer*. Ini dipengaruhi karena perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*. Saat melakukan penambahan *damper* pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0°, bentuk profil kecepatan tidak menunjukkan perubahan profil kecepatan yang signifikan. Secara garis besar hampir sama, namun terdapat perbedaan pada daerah *centerline* profil kecepatan. Hal ini dikarenakan karena adanya *friction loss* yang terjadi karena adanya penambahan *damper*, sehingga terdapat keterlambatan aliran pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° akibat dari penambahan bidang gesek.

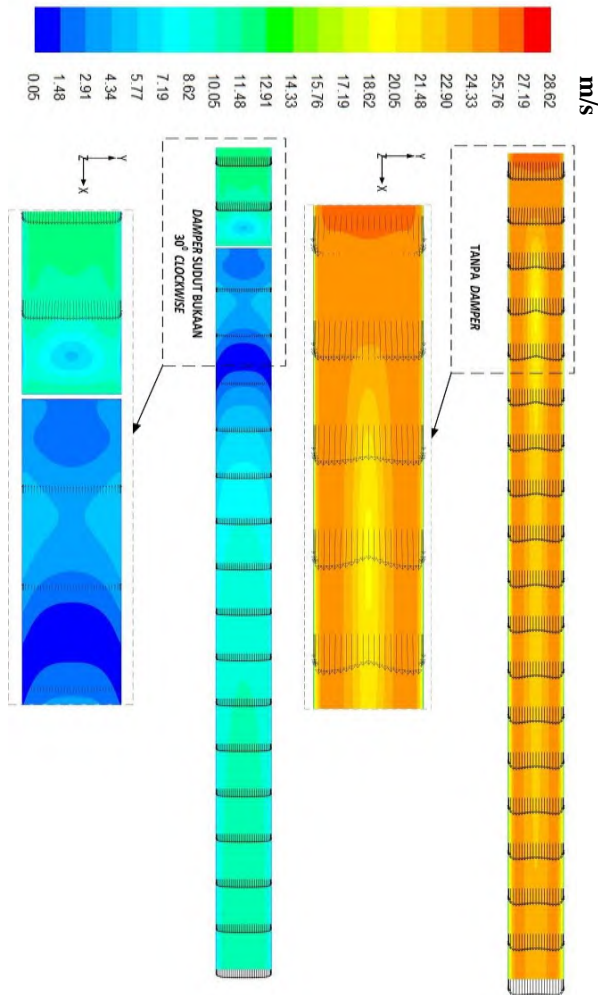
4.1.2 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan *Ducting* Saat Tanpa *Damper* Dengan *Ducting* Pada Sudut Bukaan *Damper* 30° CW Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

Berikut perkembangan profil kecepatan aliran serta kontur kecepatan yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran, baik secara horizontal dan vertikal pada setiap *cross section* ditampilkan pada gambar 4.9 dan gambar 4.10.

Gambar berikut merupakan bentuk profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal tiap *section* pada *ducting* saat tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*. Pada bidang horizontal, absis grafik profil kecepatan menunjukkan z/D_h dimana nilai $z/D_h = -0,5$ merupakan sisi *inner ducting* dan $z/D_h = 0,5$ merupakan sisi *outer ducting*. Sedangkan pada bidang vertikal, absis grafik profil kecepatan menunjukkan y/D_h dimana nilai $y/D_h = -0,5$ merupakan sisi atas *ducting* dan $z/D_h = 0,5$ merupakan sisi bawah *ducting*. Kemudian ordinat grafik profil kecepatan adalah nilai dari u/U_{ref} , dimana $u/U_{ref} = 1$ menunjukkan bahwa kecepatan lokal pada *section* tersebut sama dengan kecepatan referensi. Sumbu x grafik profil kecepatan baik pada bidang horizontal dan bidang vertikal adalah nilai dari u/U_{ref} .



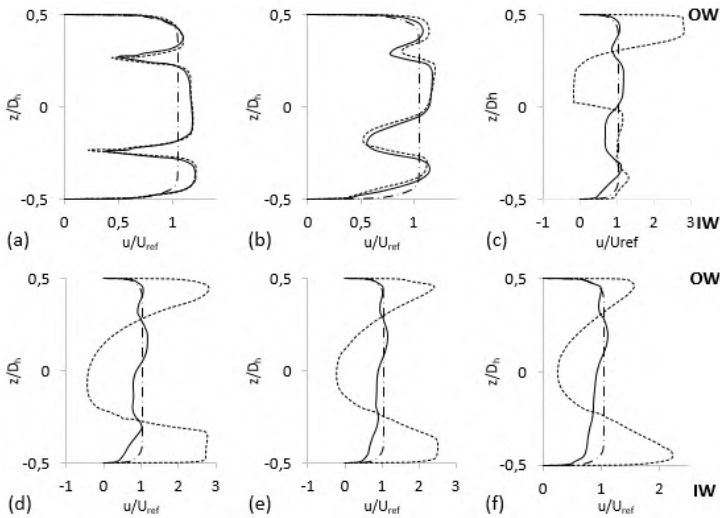
Gambar 4.5 Perbandingan perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° clockwise bidang horizontal.

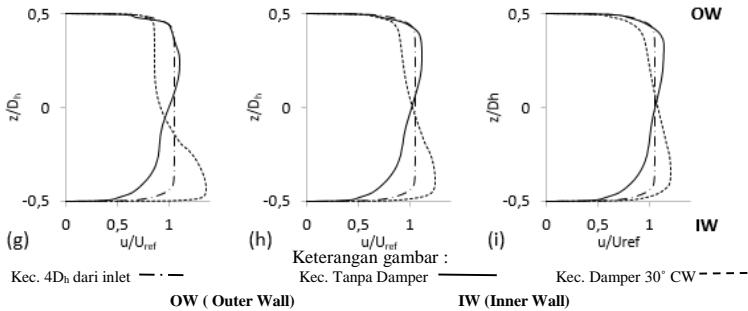


Gambar 4.6 Perbandingan perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° clockwise bidang vertikal.

Dari gambar 4.5 dan 4.6 terlihat bahwa bentuk profil kecepatan disepanjang *downstream straight duct* antara kedua

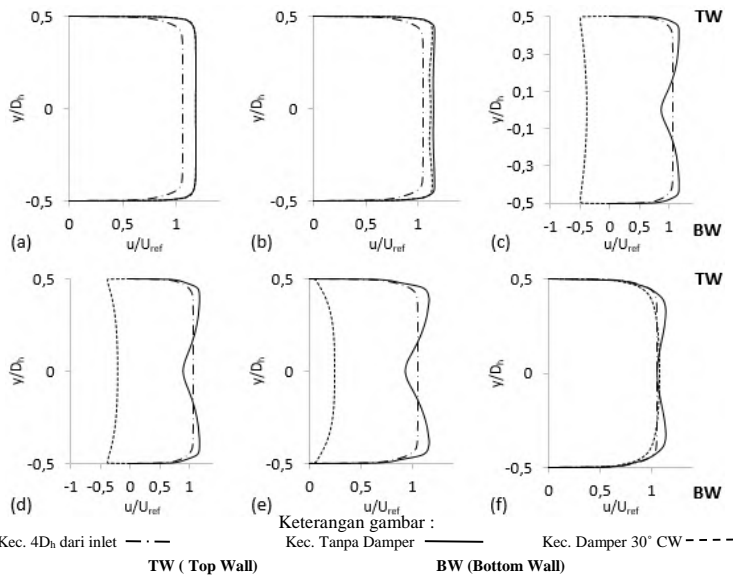
variasi terlihat berbeda. Berdasarkan hasil simulasi numerik yang dilakukan, adanya *dampner* dengan sudut bukaan 30° *clockwise* memberi pengaruh terhadap karakteristik aliran setelah melewati elbow. Dimana saat aliran berada pada *section 3*, pada variasi *ducting* tanpa *dampner* tidak terlihat adanya *backflow* di bidang horizontal maupun bidang vertikal. Hal ini dikuatkan dengan gradasi warna yang ditunjukkan oleh kontur kecepatan, dimana pada *section* tersebut hanya terdapat penurunan kecepatan. Sedangkan pada variasi *ducting* dengan sudut bukaan *dampner* 30° *clockwise*, terdapat *backflow* dibidang horizontal maupun bidang vertikal saat melewati *dampner*. Sehingga profil kecepatan aliran yang melewati *elbow* tidak lagi memiliki karakteristik yang hampir serupa antara kedua variasi ini. Perbedaan profil kecepatan aliran ini dapat diilustrasikan pada gambar 4.7.





Gambar 4.7 Perbandingan grafik *velocity profile* secara horizontal antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° CW setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ; g) 9 ; h) 13 ; i) 18

Bentuk profil kecepatan antara kedua variasi pada 2 *cross-section* sebelumnya, yaitu pada $x=0$ dan $x/D_h=1$ aliran masih hampir serupa. Tetapi dapatNamun saat aliran berada di *section* 3 yaitu $x/D_h=2$, bentuk profil kecepatan pada bidang horizontal antara *ducting* tanpa *damper* dengan *ducting* pada sudut bukaan *damper* 30° *clockwise* memiliki perbedaan yang signifikan. Pada *section* 3, profil kecepatan aliran pada *ducting* tanpa *damper* tidak menunjukkan adanya *backflow*. Sedangkan di *section* yang sama pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*, terdapat *backflow* dimana kecepatan sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner*. *Backflow* terjadi hingga *cross-section* berikutnya hingga pada $x/D_h=5$. Mulanya, aliran sepanjang *downstream* menunjukkan bahwa kecepatan pada sisi *outer* lebih tinggi dibanding sisi *inner*. Kemudian aliran mengalami perpindahan kecepatan sejalan dengan arah perkembangan aliran, kecepatan sisi *inner* lebih tinggi dibandingkan dengan sisi *outer* hal ini diikuti dengan menghilangnya *backflow*. Kedua aliran ini masih belum mengalami *recovery* aliran, karena masih terdapat kecepatan yang melebihi kecepatan referensi pada *outter wall*. Ini terjadi hingga $x/D_h=18$.



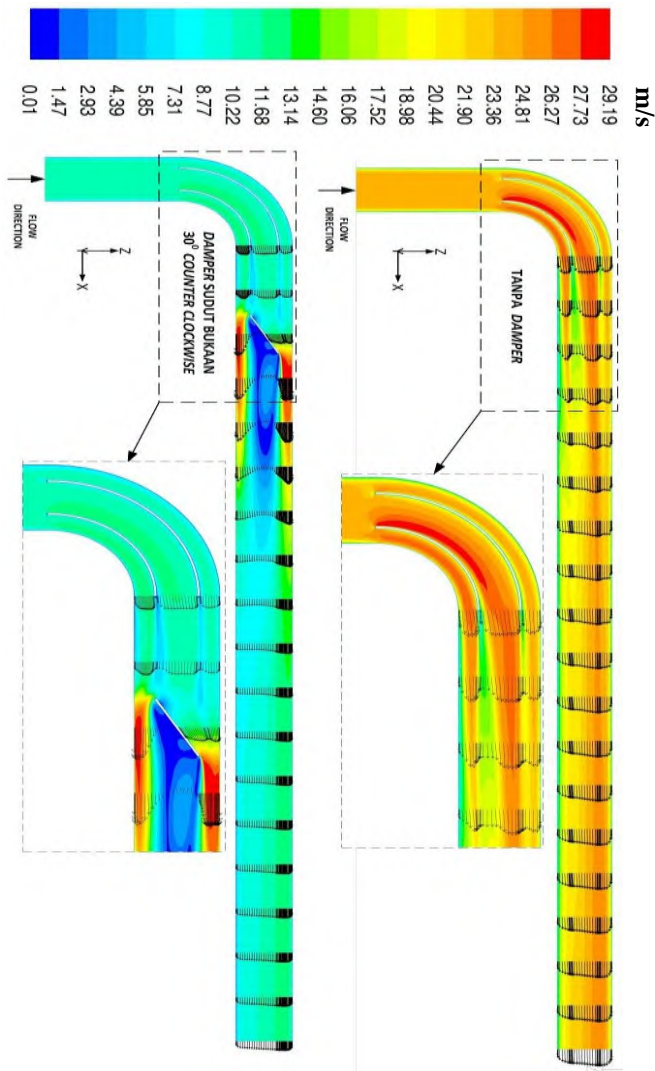
Gambar 4.8 Perbandingan grafik *velocity profile* secara vertikal antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° CW setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 3 ; d) 4 ; e) 5 ; f) 18

Dari bidang vertikal, terdapat perbedaan aliran di daerah sekitar $y/D_h=0$ pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*. Hal ini disebabkan karena adanya *backflow* di daerah belakang *damper*. *Backflow* terjadi disepanjang bidang vertikal mulai dari sisi atas hingga sisi bawah pada $x/D_h=3$ hingga $x/D_h=5$. Namun pada $x/D_h=5$ hingga $x/D_h=18$ aliran mengalami perkembangan hingga aliran mampu *recovery*. Aliran yang mampu *recovery* ini terjadi pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*, ini terjadi saat aliran berada pada *section* 7 hingga *section* 19. Namun aliran belum mampu *recovery* pada *ducting* tanpa *damper*. Hal ini juga ditunjukkan dengan gradasi warna pada kontur kecepatan.

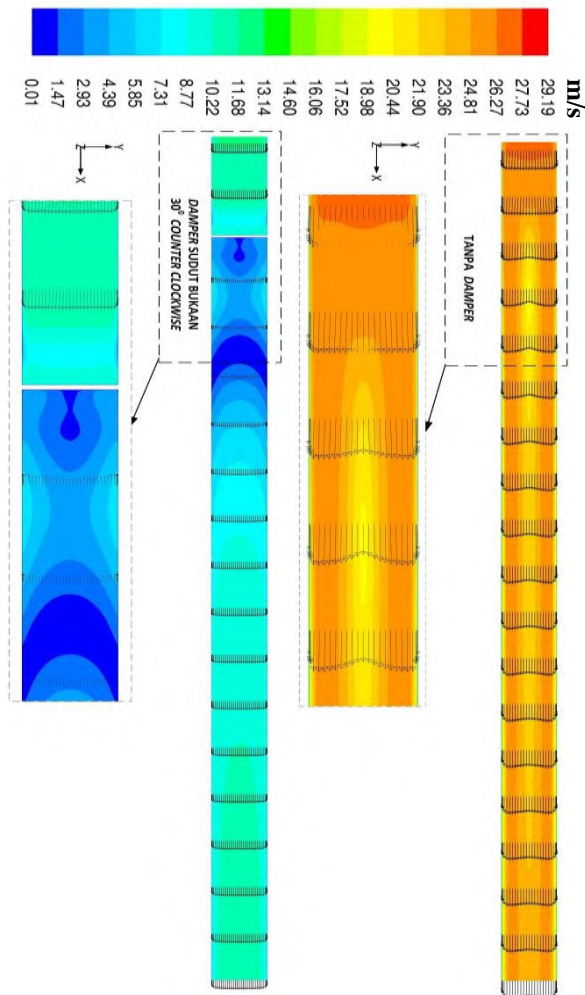
Ternyata penambahan *guide vane* dapat mengurangi *separation loss* yang terjadi pada *outlet elbow*. Analisa ini dikuatkan dengan tidak adanya *backflow* di daerah *elbow* pada profil kecepatan pada $x=0$. Dari Kontur kecepatan menunjukkan bahwa pembagian aliran oleh *guide vane* mampu menambah momentum aliran akibat adanya perbedaan tekanan pada *inner wall* dan *outer wall*. Profil kecepatan setelah melewati *elbow*, pada sisi *inner* lebih besar daripada sisi *outer*. Ini dipengaruhi karena perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*. Sedangkan saat dilakukan penambahan *damper* pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*, bentuk profil kecepatan menunjukkan adanya *backflow*. Hal ini terjadi karena *damper* menyisakan sedikit ruang untuk lewatnya aliran pada daerah *outer* dan *inner wall*. Aliran terseparasi saat melintasi *damper*, ini terjadi karena aliran tidak mampu mengikuti kontur bodi. Dimana sesaat setelah melewati *damper* kecepatan pada sisi *outer* lebih tinggi daripada sisi *inner*, hal ini terjadi karena kecenderungan udara untuk melewati daerah dengan hambatan lebih kecil. Namun saat mengalami perkembangan aliran, terjadi pemindahan energi dari sisi *inner* ke sisi *outer*, karena terdapat perbedaan tekanan ini mengakibatkan kecepatan tinggi pada sisi *outer* berpindah ke sisi *inner*. Kedua variasi ini menunjukkan bahwa aliran dari bidang vertikal maupun horizontal pada akhir *section* instalasi ini belum mendekati keadaan *recovery*. Perbedaan yang jelas terlihat pada aliran setelah melewati *damper* karena terdapat keterlambatan aliran karena adanya *separation loss* yang sangat besar pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*.

4.1.3 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan *Ducting* Saat Tanpa *Damper* Dengan *Ducting* Pada Sudut Bukaan *Damper* 30° CCW Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

Berikut perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran, baik secara horizontal dan vertikal pada setiap *cross-section* ditampilkan pada gambar 4.9 dan gambar 4.10.



Gambar 4.9 Perbandingan perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° CCW bidang horizontal.

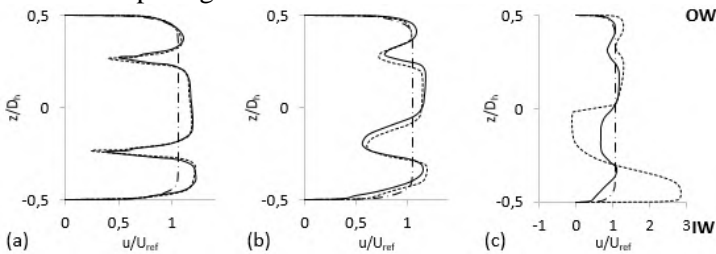


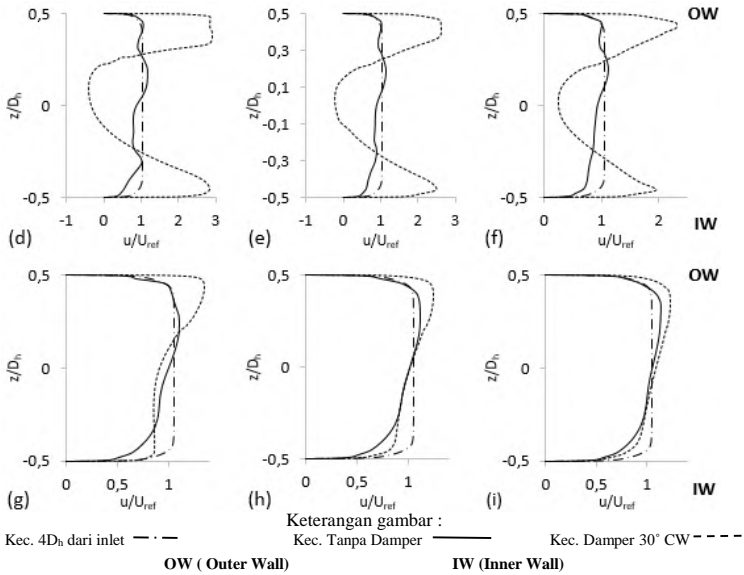
Gambar 4.10 Perbandingan perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° CCW bidang vertikal

Gambar berikut merupakan bentuk profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal tiap section pada *ducting* saat tanpa *damper*

dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise*. Pada bidang horizontal, absis grafik profil kecepatan menunjukkan z/D_h dimana nilai $z/D_h = -0,5$ merupakan sisi *inner ducting* dan $z/D_h = 0,5$ merupakan sisi *outer ducting*. Sedangkan pada bidang vertikal, absis grafik profil kecepatan menunjukkan y/D_h dimana nilai $y/D_h = -0,5$ merupakan sisi atas *ducting* dan $z/D_h = 0,5$ merupakan sisi bawah *ducting*. Kemudian ordinat grafik profil kecepatan adalah nilai dari u/U_{ref} , dimana $u/U_{ref} = 1$ menunjukkan bahwa kecepatan lokal pada *section* tersebut sama dengan kecepatan referensi. Sumbu x grafik profil kecepatan baik pada bidang horizontal dan bidang vertikal adalah nilai dari u/U_{ref} . Agar lebih detail, maka dipaparkan dalam grafik perbandingan profil kecepatan antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise*.

Dari gambar 4.9 dan 4.10 terlihat bahwa bentuk profil kecepatan disepanjang *downstream straight duct* antara kedua variasi terlihat berbeda. Berdasarkan hasil simulasi numerik yang dilakukan, adanya *damper* dengan sudut bukaan 30° *counter clockwise* memberi pengaruh terhadap karakteristik yang hampir sama dengan *damper* sudut bukaan 30° *clockwise*. Baik pada sudut bukaan *damper* 30° *clockwise* dan 30° *counter clockwise* tidak terlihat adanya backflow di bidang horizontal maupun bidang vertikal pada bagian elbow. Terdapat backflow pada *cross section* setelah *damper*, dimana terdapat perbedaan bentuk backflow antara sudut bukaan *damper* 30° *clockwise* dan 30° *counter clockwise*. Perbedaan profil kecepatan aliran ini dapat diilustrasikan pada gambar 4.7.

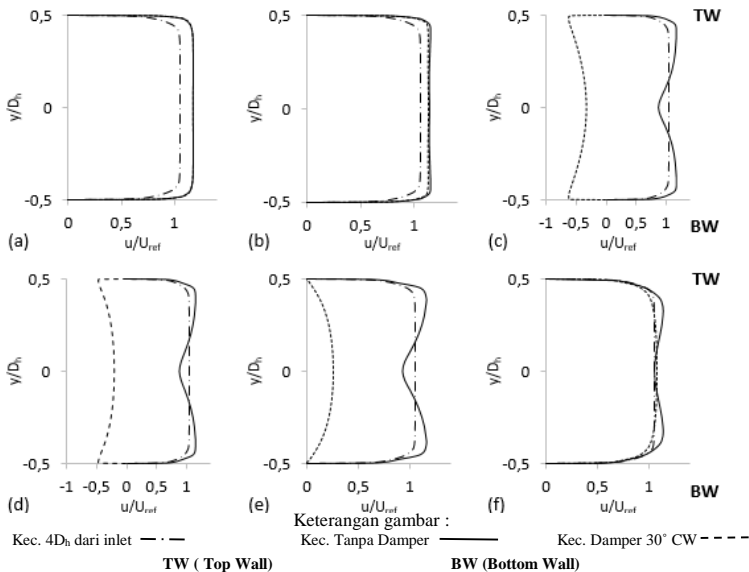




Gambar 4.11 Perbandingan grafik *velocity profile* secara horizontal antara *ducting* tanpa *damp*er dan *ducting* dengan sudut bukaan *damp*er 30° *counter clockwise* pada setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1; c) 2; d) 3; e) 4; f) 5; g) 9; h) 13; i) 18

Bentuk profil kecepatan antara kedua variasi pada 2 *cross-section* sebelumnya, yaitu pada $x=0$ dan $x/D_h=1$ aliran masih hampir serupa. Namun saat aliran berada di *section* 3 yaitu $x/D_h=2$, bentuk profil kecepatan pada bidang horizontal antara *ducting* tanpa *damp*er dengan *ducting* pada sudut bukaan *damp*er 30° *counter clockwise* memiliki perbedaan yang signifikan. Pada *section* 3, profil kecepatan aliran pada *ducting* tanpa *damp*er tidak menunjukkan adanya *backflow*. Sedangkan di *section* yang sama pada *ducting* dengan sudut bukaan *damp*er 30° *counter clockwise*, terdapat *backflow* dimana kecepatan sisi *inner* lebih besar daripada sisi *outer*. *Backflow* terjadi hingga *cross-section* berikutnya hingga pada $x/D_h=5$. Mulanya, aliran sepanjang downstream menunjukkan bahwa kecepatan pada sisi *inner* lebih tinggi

dibanding sisi *outer*. Kemudian aliran mengalami perpindahan kecepatan sejalan dengan arah perkembangan aliran, terjadi percepatan pada salah satu sisi dimana kecepatan sisi *outer* lebih tinggi dibandingkan dengan sisi *inner* hal ini diikuti dengan menghilangnya backflow. Kedua aliran ini masih belum mengalami *recovery* aliran, karena masih terdapat kecepatan yang melebihi kecepatan referensi pada *outter wall*. Ini terjadi hingga $x/D_h=18$.



Gambar 4.12 Perbandingan grafik *velocity profile* secara vertikal antara *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan 30° *counter clockwise* pada setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 3 ; d) 4 ; e) 5 ; f) 18

Dari bidang vertikal, terdapat perbedaan aliran di daerah sekitar $y/D_h=0$ pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise*. Hal ini disebabkan karena adanya *backflow* di daerah belakang *damper*. *Backflow* terjadi disepanjang bidang vertikal mulai dari sisi atas hingga sisi bawah pada $x/D_h=3$ hingga $x/D_h=5$. Namun pada $x/D_h=5$ hingga $x/D_h=18$ aliran mengalami

perkembangan hingga aliran mampu *recovery*. Aliran yang mampu *recovery* ini terjadi pada kedua variasi saat aliran berada pada *section 7* hingga *section 19*. Hal ini juga ditunjukkan dengan gradasi warna pada kontur kecepatan. Dimana kecepatan lokal mendekati kecepatan referensi. Bentuk profil kecepatan aliran antara *ducting* dengan sudut bukaan *damper 30° counter clockwise* dan *damper 30° clockwise* hampir serupa pada bidang vertikal.

Dari penjelasan data pada paragraf sebelumnya, dapat dianalisis bahwa penambahan *guide vane* pada suatu *ducting* dapat mengurangi *separation loss* yang terjadi pada *outlet elbow*. Analisa ini dikuatkan dengan tidak adanya *backflow* di daerah *elbow* pada profil kecepatan pada $x=0$. Serta gradasi dari kontur kecepatan yang menunjukkan bahwa pembagian aliran dengan adanya *guide vane* mampu mengurangi *separation loss*, sehingga aliran yang kekurangan momentum akibat adanya perbedaan tekanan pada *inner wall* dan *outer wall* mampu diatasi dengan adanya *double guide vane* pada *elbow*. Kemudian saat melakukan penambahan *damper* pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper 30° counter clockwise*, bentuk profil kecepatan menunjukkan adanya *backflow*. Hal ini terjadi karena *damper* menyisakan sedikit ruang untuk lewatnya aliran pada daerah *outer* dan *inner wall*. Aliran terseparasi saat melintasi *damper*, ini terjadi karena aliran tidak mampu mengikuti kontur bodi. Dimana sesaat setelah melewati *damper* kecepatan pada sisi *inner* lebih tinggi daripada sisi *outer*, hal ini terjadi karena kecenderungan udara untuk melewati daerah dengan hambatan lebih kecil. Namun saat mengalami perkembangan aliran, terjadi pemindahan energi dari sisi *outer* ke sisi *inner*, karena terdapat perbedaan tekanan ini mengakibatkan kecepatan tinggi pada sisi *inner* berpindah ke sisi *outer*. Kondisi ini hampir sama dengan *ducting* sudut bukaan *damper 30° clockwise*, namun terdapat perbedaan kecepatan pada daerah *inner* dan *outer*. Kedua variasi ini menunjukkan bahwa aliran dari bidang vertikal maupun horizontal pada akhir *section* instalasi ini belum mendekati keadaan *recovery*. Perbedaan yang jelas terlihat pada aliran setelah melewati *damper* karena terdapat keterlambatan

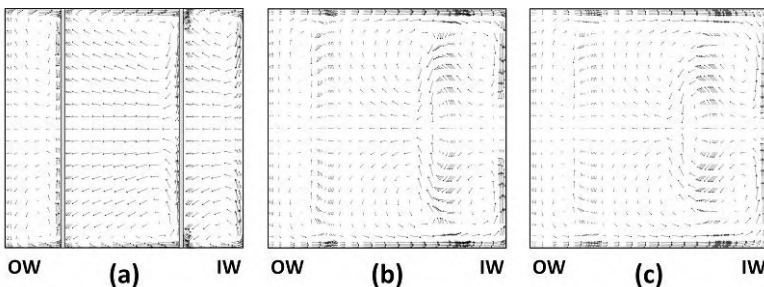
aliran karena adanya *separation loss* yang sangat besar pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise*.

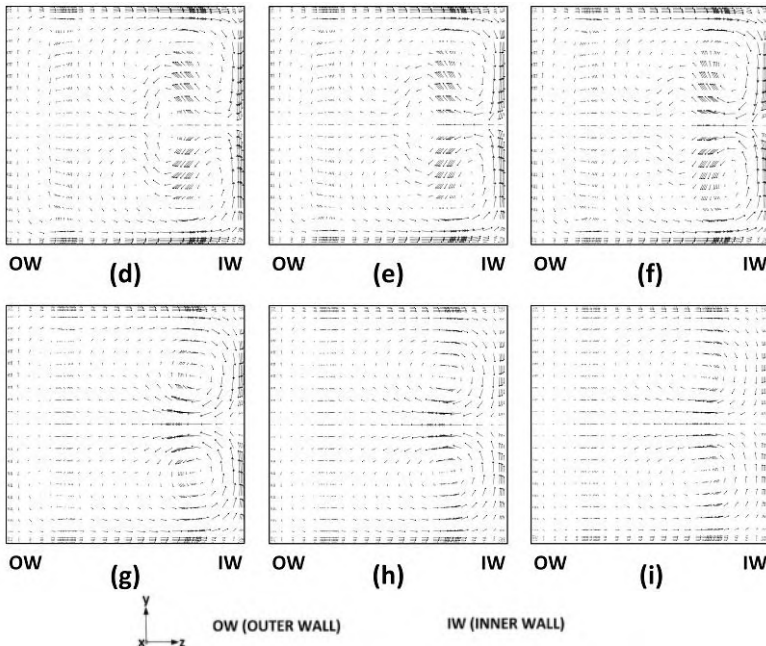
4.2 Perbandingan Vektor Kecepatan Setiap *Cross-Section* Pada Setiap Variasi Model Uji *Ducting* Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

Pembahasan dalam bab ini akan disampaikan data kualitatif berupa visualisasi vektor kecepatan pada *cross-section* tertentu. Dari visualisasi vektor kecepatan aliran pada setiap model uji *ducting* saat $Re = 7,88 \times 10^4$ akan didapat perbandingan yang lebih jelas mengenai perilaku aliran yang terjadi secara tiga dimensi. Berikut hasil dari masing-masing *cross-section* berupa gambar vektor kecepatan pada setiap variasi model uji *ducting* yang akan dijelaskan dalam beberapa bagian dari sub-bab.

4.2.1 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap *Cross-Section Ducting Tanpa Damper*

Berdasarkan gambar 4.13 terlihat visualisasi vektor kecepatan aliran *ducting* tanpa *damper* dalam bentuk dua dimensi, dimana koordinat sumbu yang digunakan yaitu koordinat y sebagai absis dan koordinat z sebagai ordinat. Visualisasi aliran ini untuk menunjukkan ada atau tidaknya kecepatan lain selain kecepatan ke arah koordinat x, dimana vektor kecepatan aliran diambil mulai dari *outlet elbow* hingga $x/D_h=18$. Berikut gambar dari vektor kecepatan.





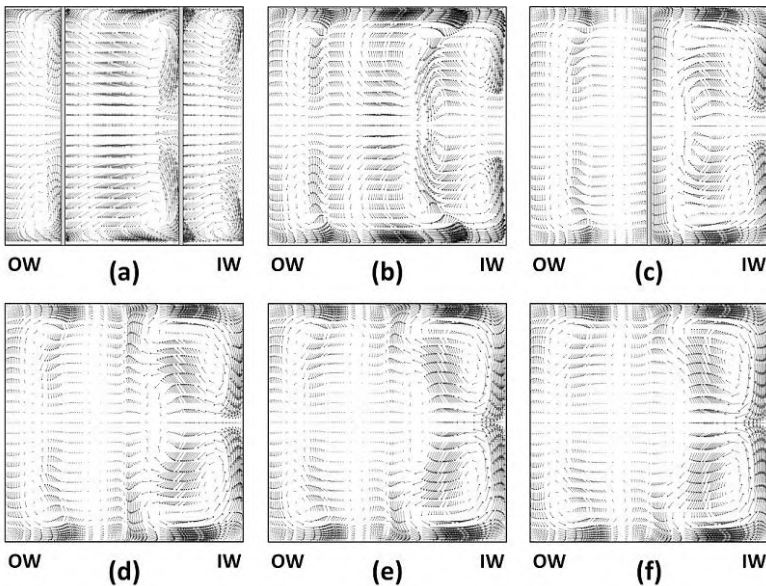
Gambar 4.13 Visualisasi vektor kecepatan *ducting* tanpa *damper* setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ; g) 9 ; h) 13 ; i) 18

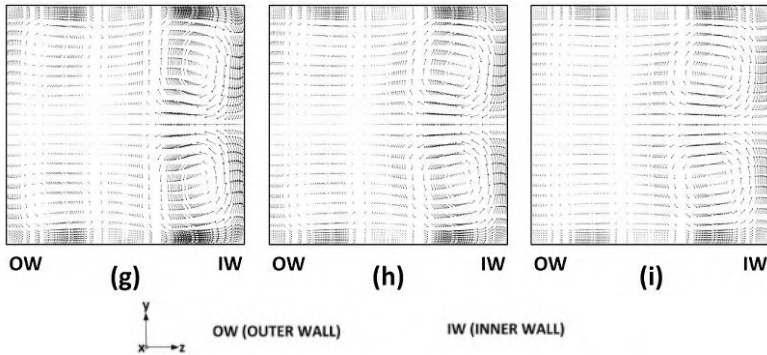
Dari gambar 4.13 dapat dianalisis sebagai berikut. Pada daerah *outlet elbow*, terjadi perlambatan yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di penampang. Namun karena terdapat penambahan *guide vane*, aliran dapat dibagi dalam bentuk yang lebih kecil. Hal ini lebih menguntungkan karena aliran sekunder yang terjadi pada *ducting* tanpa *guide vane* sangatlah kuat, sedangkan bentuk aliran sekunder yang terjadi lebih kecil bila ditambahkan *guide vane* pada *elbow*. Dimana pada bagian tengah *outlet elbow* dan sisi *inner*-nya terjadi aliran sekunder yang lebih besar dibandingkan dengan sisi *outer*-nya. Hal ini berpengaruh terhadap bentuk *velocity profile* bidang horizontal yang terlihat lebih besar pada sisi *inner*-nya. Setelah aliran mengalir hingga

berada $18D_h$ aliran sekunder berangsur-angsur berkurang, namun baik pada sisi *inner* dan sisi *outer* aliran sekunder masih terjadi.

4.2.2 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap *Cross-Section* Ducting Pada Sudut Bukaannya 0°

Berdasarkan gambar 4.13 terlihat visualisasi vektor kecepatan aliran *ducting* tanpa *damper* dalam bentuk dua dimensi, dimana koordinat sumbu yang digunakan yaitu koordinat y sebagai absis dan koordinat z sebagai ordinat. Visualisasi aliran ini untuk menunjukkan ada atau tidaknya kecepatan lain selain kecepatan ke arah koordinat x, dimana vektor kecepatan aliran diambil mulai dari *outlet elbow* hingga $x/D_h=18$. Berikut gambar dari vektor kecepatan.





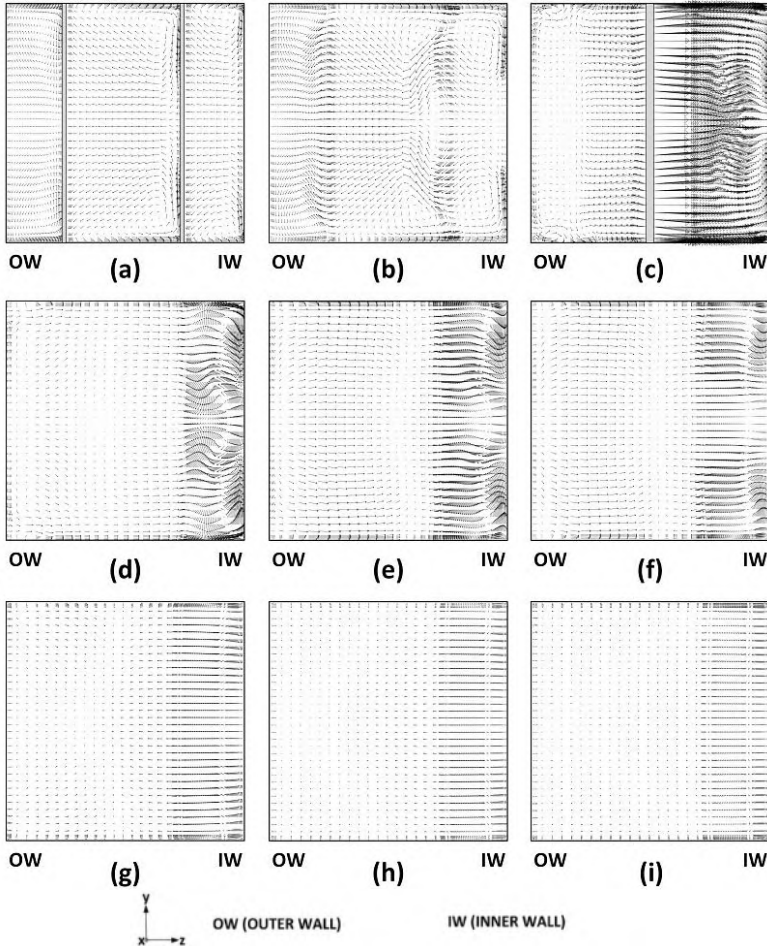
Gambar 4.14 Visualisasi vektor kecepatan *ducting* pada sudut bukaan *damper* 0° setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0; b) 1; c) 2; d) 3; e) 4; f) 5; g) 9; h) 13; i) 18

Analisis gambar 4.14, pada daerah *outlet elbow* terjadi perlambatan yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di penampang. Namun karena terdapat penambahan guide vane, aliran sekunder dapat dibagi dalam bentuk yang lebih kecil. Dimana pada bagian tengah *outlet elbow* dan sisi *inner*-nya terjadi aliran sekunder yang lebih besar dibandingkan dengan sisi *outer*-nya. Hal ini berpengaruh terhadap bentuk *velocity profile* bidang horizontal yang terlihat lebih besar pada sisi *inner*-nya. Setelah aliran mengalir hingga berada $18D_h$ aliran sekunder berangsur-angsur berkurang, namun baik pada sisi *inner* dan sisi *outer* aliran sekunder masih terjadi. Dimana aliran sekunder pada sisi *inner* lebih besar daripada sisi *outer*. Jika dibandingkan dengan vektor kecepatan aliran pada *ducting* tanpa *damper*, aliran sekunder pada *ducting* pada sudut bukaan *damper* 0° yang terjadi tidak sekuat dan sebesar *ducting* tanpa *damper*. Hal ini terjadi karena aliran dipecah lagi oleh *damper* pada $x/D_h=2$, sehingga keberadaannya mampu mempengaruhi aliran setelahnya.

4.2.3 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap Cross-Section Ducting Pada Sudut Bukaan Damper 30° CW

Berdasarkan gambar 4.15 terlihat visualisasi aliran *ducting* pada sudut bukaan *damper* 30° *clockwise* dalam bentuk dua

dimensi, dimana koordinat sumbu yang digunakan yaitu koordinat y sebagai absis dan koordinat z sebagai ordinat. Visualisasi aliran diambil dari *outlet elbow* hingga $x/D_h=18$. Berikut gambar dari vektor kecepatan.

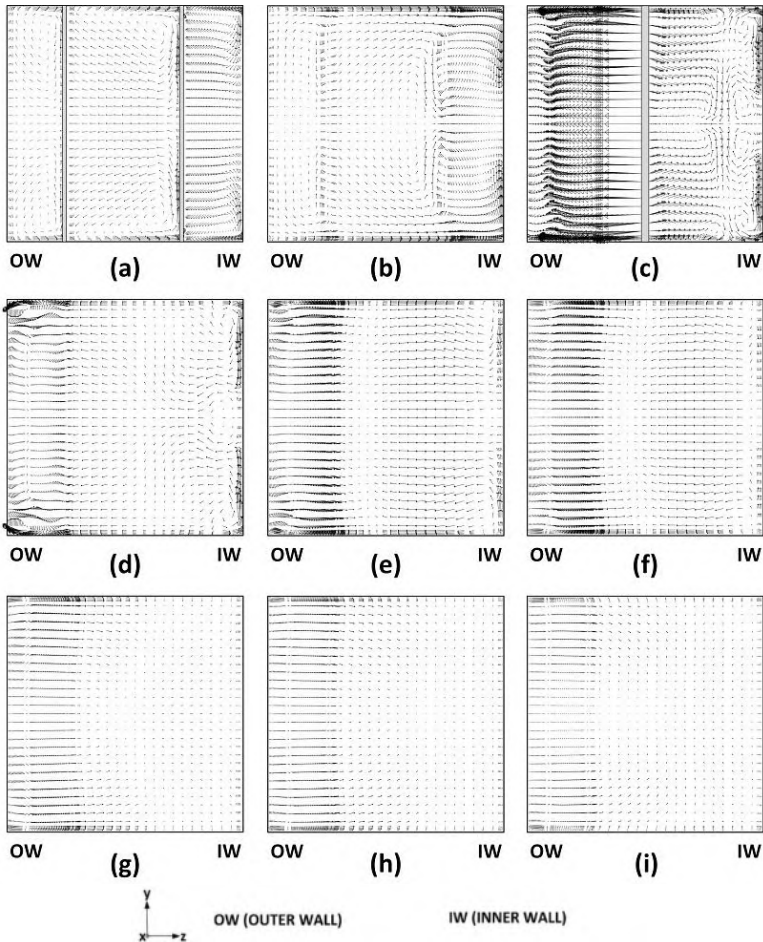


Gambar 4.15 Visualisasi vektor kecepatan *ducting* pada sudut bukaan *damper* 30° CW setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0 ; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ; g) 9 ; h) 13 ; i) 18

Dari gambar 4.15 dapat dianalisis sebagai berikut. Pada daerah *outlet elbow*, terjadi perlambatan yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di penampang. Namun karena terdapat penambahan *guide vane*, aliran sekunder dapat dibagi dalam bentuk yang lebih kecil. Dimana pada bagian tengah *outlet elbow* dan sisi *inner*-nya terjadi aliran sekunder yang lebih besar dibandingkan dengan sisi *outer*-nya. Hal ini berpengaruh terhadap bentuk *velocity profile* bidang horizontal yang terlihat lebih besar pada sisi *inner*-nya. Kemudian saat aliran mengalir melintasi damper dengan sudut bukaan 30° *clockwise*, terjadi percepatan pada daerah *inner wall* dan perlambatan pada sisi *outer*. Ini terjadi karena kecenderungan udara untuk melewati bagian dengan hambatan yang lebih kecil, sehingga terjadi penumpukan aliran pada sisi *inner* yang mempengaruhi terjadinya percepatan pada sisi *inner*. Setelah aliran mengalir hingga berada $18D_h$ aliran sekunder berangsur-angsur berkurang, baik pada sisi *inner* dan sisi *outer* aliran sekunder sudah tidak terjadi. Hal ini ditandai dari tiap-tiap vektornya berbentuk titik seluruhnya, artinya vektor tersebut searah dengan sumbu x. Jika dibandingkan dengan vektor kecepatan aliran pada *ducting* tanpa *damper*, aliran sekunder pada *ducting* pada sudut bukaan *damper* 0° yang terjadi tidak sekuat dan sebesar *ducting* tanpa *damper*. Hal ini terjadi karena aliran dipecah lagi oleh *damper* pada $x/D_h=2$, sehingga keberadaannya mampu mempengaruhi aliran setelahnya.

4.2.4 Visualisasi Vektor Kecepatan Setiap Cross-Section Ducting Pada Sudut Bukaan Damper 30° CCW

Berdasarkan gambar 4.16 terlihat visualisasi aliran *ducting* pada sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise* dalam bentuk dua dimensi, dimana koordinat sumbu yang digunakan yaitu koordinat y sebagai absis dan koordinat z sebagai ordinat. Visualisasi aliran diambil dari *outlet elbow* hingga $x/D_h=18$. Berikut gambar dari vektor kecepatan.



Gambar 4.16 Visualisasi vektor kecepatan *ducting* pada sudut bukaan *damper* 30° CCW setiap posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a) 0 ; b) 1 ; c) 2 ; d) 3 ; e) 4 ; f) 5 ; g) 9 ; h) 13 ; i) 18

Dari gambar 4.16 dapat dianalisis sebagai berikut. Pada daerah *outlet elbow*, terjadi perlambatan yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di penampang. Namun karena terdapat penambahan *guide vane*, aliran sekunder dapat dibagi

dalam bentuk yang lebih kecil. Dimana pada bagian tengah *outlet elbow* dan sisi *inner*-nya terjadi aliran sekunder yang lebih besar dibandingkan dengan sisi *outer*-nya. Hal ini berpengaruh terhadap bentuk *velocity profile* bidang horizontal yang terlihat lebih besar pada sisi *inner*-nya. Kemudian saat aliran mengalir melintasi damper dengan sudut bukaan 30° *counter clockwise*, terjadi percepatan pada daerah *outer wall* dan perlambatan pada sisi *inner*. Ini terjadi karena kecenderungan udara untuk melewati bagian dengan hambatan yang lebih kecil, sehingga terjadi penumpukan aliran pada sisi *outer* yang mempengaruhi terjadinya percepatan pada sisi *outerr*. Setelah aliran mengalir hingga berada $18D_h$ aliran sekunder berangsur-angsur berkurang, baik pada sisi *inner* dan sisi *outer* aliran sekunder masih terjadi. Namun aliran sekunder yang terjadi sangatlah kecil dan sedikit, hal ini ditunjukkan dengan sebagian besar dari vektornya sudah menjadi titik-titik yang searah dengan sumbu x.

4.3 Perbandingan Pada Setiap Model Uji *Ducting*

Dalam sub bab ini akan disampaikan informasi berupa perbandingan data kuantitatif dan kualitatif setiap variasi model uji *ducting*. Dimana data kuantitatif berupa tabel *pressure drop* serta grafik *velocity profile* dan data kualitatif berupa vektor kecepatan pada *cross-section* tertentu.

Data kuantitatif yang ditampilkan berupa karakteristik *pressure drop* yang terjadi pada *ducting* diinterpretasikan didalam tabel. Berikut data kuantitatif pada setiap variasi model uji *ducting* ditunjukkan dalam tabel 4.1.

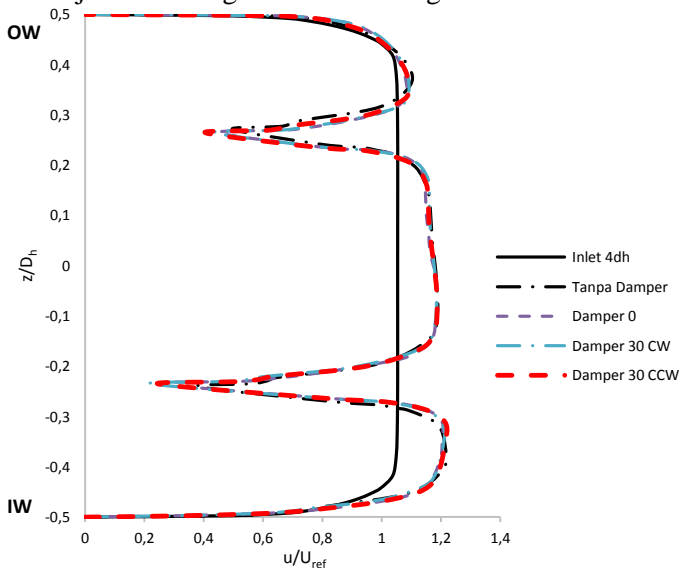
Tabel 4.1 Tabel *pressure drop* tiap variasi model uji pada *ducting*

Variasi <i>Damper</i>	Inlet (Pa)	Outlet (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa Damper	25,152	-14,734	39,886
0°	23,781	-19,510	43,291
30° CW	23,892	-239,722	263,613
30° CCW	23,041	-249,792	272,833

Nilai *pressure drop* dipengaruhi oleh penambahan *damper* dan penambahan sudut bukaan *damper*. Dengan bilangan *Reynolds*

$7,88 \times 10^4$ yang sama, *ducting* tanpa damper memiliki nilai *pressure drop* paling kecil dengan angka 39,89 pa. Sedangkan *pressure drop* paling besar terjadi pada *ducting* sudut bukaan damper 30° ccw dengan nilai 226,75 pa.

Adanya perbedaan tekanan pada sisi *inlet* pada variasi *ducting* tanpa damper dengan ketiga variasi lainnya disebabkan oleh keberadaan damper. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari damper pada *downstream* bukan hanya mempengaruhi tekanan setelah melewati damper saja, namun pengaruh damper juga terjadi saat aliran berada daerah *upstream*. Perubahan sudut damper juga berpengaruh terhadap karakteristik kecepatan aliran, karena aliran dipaksa untuk mengikuti kontur bodi pengganggu, ini dilakukan untuk memperoleh aliran yang diinginkan. Karakteristik yang diinginkan dalam penelitian ini yaitu aliran mampu *recovery* hingga menyerupai aliran saat melintas sejauh $4D_h$ dari inlet *ducting*. Bentuk karakteristik aliran pada setiap variasi *ducting* akan ditunjukkan oleh gambar 4.17 dan gambar 4.18.



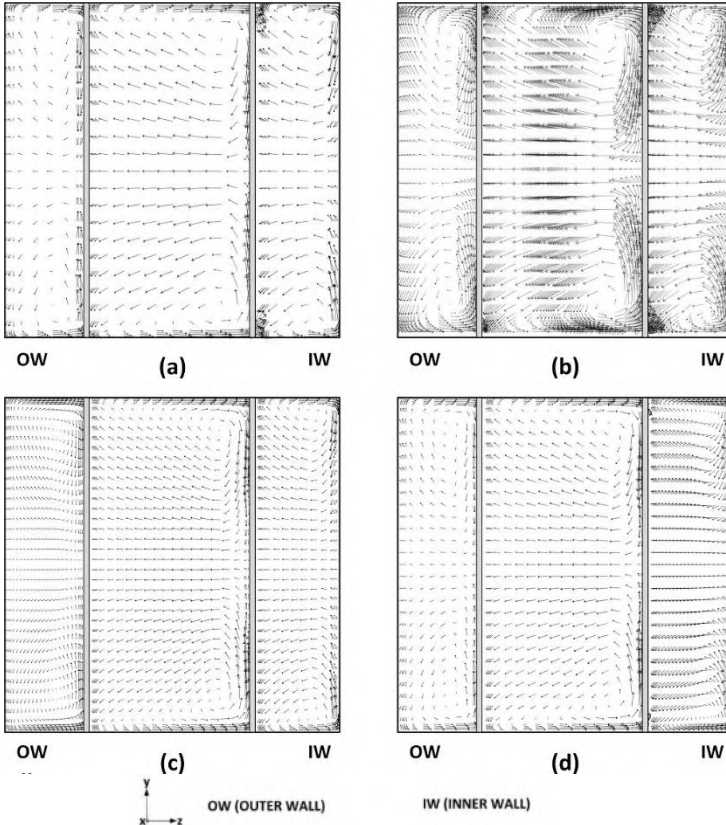
Gambar 4.17 Perbandingan grafik velocity profile setiap variasi model uji *ducting* pada outlet elbow

Dari gambar 4.17, dapat dianalisis bahwa secara garis besar penambahan *guide vane* pada setiap variasi model uji *ducting* dapat mengurangi *separation loss* yang terjadi pada *outlet elbow*. Hal ini sesuai dengan fungsi *guide vane* yang bertujuan untuk memecah aliran sekunder setelah melintasi *elbow*. Analisa ini dikuatkan dengan tidak adanya *backflow* di daerah *elbow* pada profil kecepatan pada $x=0$. Bentuk profil kecepatan pada setiap variasi model uji *ducting* setelah melewati *elbow*, pada sisi *inner* lebih besar daripada sisi *outer*. Ini terjadi dikarenakan adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*, dimana saat melintasi *elbow* tekanan pada sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner*.

Perbedaan tekanan ini terjadi karena aliran melawan *nature of flow*-nya, sehingga udara dipaksa untuk mengikuti kontur yang membatasinya. Saat melakukan penambahan *damper* pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° , 30° *clockwise* dan 30° *counter clockwise*, didapat bentuk profil kecepatan yang hampir sama. Namun terdapat sedikit perbedaan pada daerah *inner* dan *guide vane outer radius*. Dimana pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan 30° *clockwise* dan *counter clockwise* mengalami perlambatan lebih besar daripada model uji *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° . Hal ini dikarenakan karena adanya *kinetic losses* yang terjadi karena adanya penambahan sudut bukaan *damper* 30° . Seolah udara mengalami perlambatan berangsur-angsur sebelum menabrak *damper* pada posisi sejauh $x/D_h=2$. Fenomena aliran dua dimensi akibat dari penambahan sudut bukaan *damper* ini akan ditunjukkan pada gambar 4.18. Berikut gambar vektor kecepatan pada *outlet elbow*.

Vektor kecepatan yang diilustrasikan pada gambar 4.18 dapat dianalisis, bahwa penambahan *guide vane* pada *elbow* mampu memecah aliran sekunder yang terjadi didalam *elbow*. Pada penelitian sebelumnya (Putra, 2016), aliran yang melintasi *elbow* tanpa adanya *guide vane* didapati aliran sekunder yang sangat besar. Dimana aliran sekunder yang sangat besar ini terjadi pada sisi *inner wall*, hal ini mempengaruhi besarnya *pressure drop* yang

terjadi pada *ducting*. Dengan melakukan penambahan *guide vane* pada *elbow* mampu mengurangi besarnya aliran sekunder yang terjadi, sehingga *pressure drop* dapat dikurangi dengan melakukan penambahan *guide vane* pada *elbow*. Karena adanya penambahan *guide vane* maka ruang didalam *elbow* terbagi menjadi 3 ruang yang kecil, sehingga aliran pun juga ikut terbagi menjadi tiga.



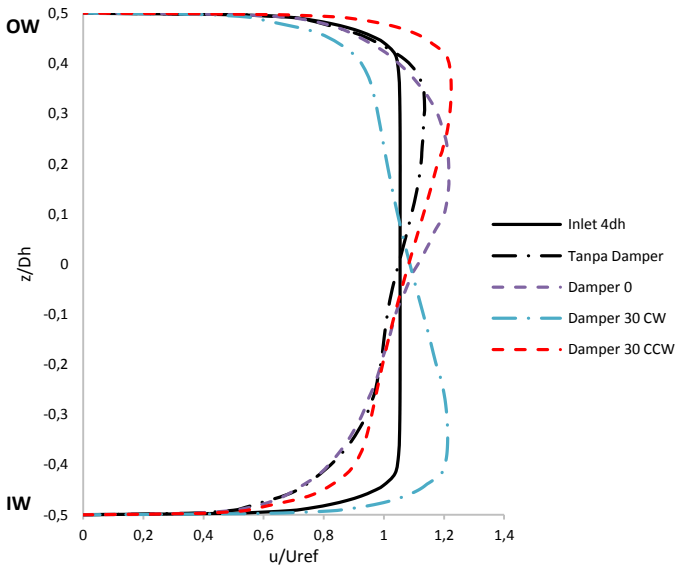
Gambar 4.18 Perbandingan vektor kecepatan model uji *ducting* pada *outlet elbow* berdasarkan variasi : a) tanpa *damper* ; b) *damper* 0° ; c) *damper* 30° clockwise ; d) *damper* 30° clockwise

Secara garis besar, vektor kecepatan pada *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° hampir sama. Pada setiap ruang yang dilalui oleh aliran memiliki bentuk vektor yang sama, dimana pada daerah *inner wall* didapati aliran sekunder yang lebih besar daripada aliran sekunder di daerah *outer wall* dan daerah *centerline elbow*. Namun dengan menambahkan sudut bukaan *damper* sebesar 30° terdapat sedikit perbedaan. Pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise* didapati aliran sekunder berupa aliran yang berpusar pada daerah *inner wall*, sedangkan pada daerah *outer wall* aliran sekunder yang terjadi lebih kecil daripada aliran sekunder pada daerah *inner wall*. Yang dimaksud lebih kecil yaitu luasan aliran sekunder yang terjadi. Kemudian aliran pada daerah *centerline* masih didapati aliran sekunder, tetapi aliran sekunder yang terjadi lebih kecil daripada model uji *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° . Hal ini juga terdapat pada *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise*, tetapi bentuk vektor kecepatan pada daerah *outer wall* dan daerah *inner wall* berkebalikan dengan *ducting* bukaan sudut 30° *clockwise*. Dimana aliran sekunder berupa aliran yang berpusar terjadi pada daerah *outer wall* dan aliran sekunder yang berupa pusaran dengan bentuk yang lebih kecil terjadi pada daerah *inner wall*.

Adanya perbedaan vektor kecepatan daerah *inner wall* dan *outer wall* pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise* dengan *damper* 30° *counter clockwise*, ini terjadi dikarenakan adanya *kinetic losses* yang disebabkan bertambahnya sudut bukaan pada *damper* dan arah bukaan sudut. Karena ada pengaruh dari bentuk kontur yang akan dilalui oleh aliran, sehingga aliran secara berangsur-angsur akan mengikuti bentuk kontur yang membatasinya. Fenomena ini akan mempengaruhi aliran yang melintasi *damper* disepanjang *ducting*.

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa secara umum, karakteristik aliran yang melintasi setiap variasi model uji *ducting* hingga sejauh $18D_h$ belum dapat dinyatakan sama dengan keadaan saat aliran berada pada jarak $4D_h$ dari *inlet*. Hal ini ditunjukkan

dengan grafik *velocity profile* aliran setiap variasi model uji ducting yang belum mampu *recovery* pada setiap titik-titik kecepatannya. Hingga jarak $18D_h$, bentuk profil kecepatan yang mendekati bentuk profil kecepatan saat aliran berada pada jarak $4D_h$ dari *inlet* adalah aliran pada model uji ducting tanpa *damper*. Dengan panjang saluran dan bentuk saluran yang sama, aliran pada ducting tanpa *damper* mempunyai *friction loss* paling kecil dari model uji lainnya. Ini terjadi karena tidak ada penambahan bidang gesek baru dalam ducting. Dengan kata lain adanya *damper* akan memperbesar *friction loss* yang terjadi didalam ducting.

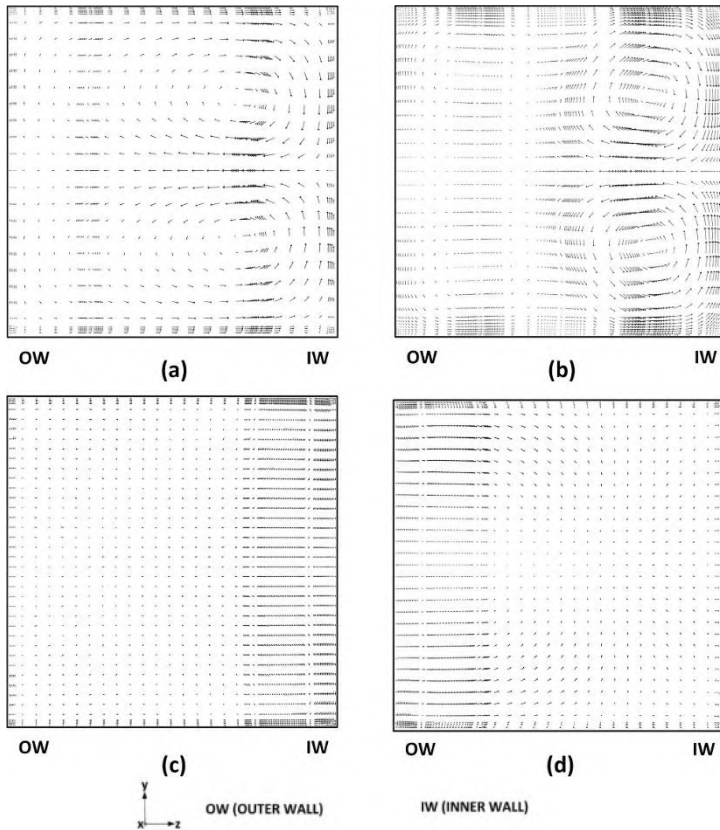


Gambar 4.19 Perbandingan grafik velocity profile setiap variasi model uji ducting pada jarak $x/D_h=18$

Pada model uji ducting tanpa *damper* masih didapati keterlambatan aliran pada daerah *inner wall*, sehingga kecepatan aliran pada daerah *outer wall* lebih tinggi. Hal ini terjadi karena pengaruh dari bentuk kelengkungan *elbow* masih terjadi hingga jarak $18D_h$. Kemudian pada model uji ducting dengan sudut bukaan *damper* 0° , terjadi perlambatan aliran pada daerah *centerline*

karena pengaruh dari penambahan bidang gesek baru. Sehingga kecepatan aliran pada daerah *outer wall* lebih tinggi daripada daerah *outer wall* model uji *ducting* tanpa *damper*. Karena ada bidang gesek baru setelah melewati *elbow*. Maka fenomena saat aliran mengalami percepatan sesaat pada daerah *outer wall* setelah meninggalkan *elbow* akan dipaksa untuk dibagi menjadi dua ruang saat melintasi *damper*, sehingga terjadi pembagian kecepatan yang tidak merata pada daerah *outer wall*. Perbedaan ini dikarenakan pengaruh dari bentuk kelengkungan *elbow* dan penambahan bidang gesek baru yang masih terjadi hingga $18D_h$. Kemudian pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*, kecepatan pada daerah *inner wall* lebih besar daripada daerah *outer wall*. Pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*, pengaruh dari kelengkungan *elbow* sudah tidak ada. Penambahan sudut bukaan *damper* ini mengakibatkan *ducting* terbagi menjadi dua ruang, dimana bentuk ruang pada daerah *outer wall* cenderung membentuk *nozzle* dan ruang pada daerah *inner wall* membentuk *diffuser*. Karena ruang pada daerah *outer wall* memiliki hambatan yang lebih kecil, maka udara akan cenderung lebih suka untuk melewati daerah *outer wall*. Ini juga dipengaruhi oleh kelengkungan *elbow*, dimana kecepatan aliran pada daerah *outer wall* lebih besar. Sehingga terjadi percepatan di daerah *outer wall* pada jarak $x/D_h=2$, adanya percepatan daerah *outer wall* diikuti dengan peningkatan tekanan pada daerah *inner wall*. Karena tekanan pada daerah *inner wall* lebih besar, maka kecepatan pada daerah *outer wall* sebagian akan berpindah ke *inner wall* searah dengan laju aliran. Hingga pada $x/D_h=18$, kecepatan pada daerah *inner wall* lebih besar daripada daerah *outer wall*. Sedangkan pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise*, merupakan kebalikan dari model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*. Dimana profil kecepatan aliran hingga $18D_h$ didapati bahwa kecepatan aliran pada daerah *outer wall* lebih besar daripada kecepatan aliran pada daerah *inner wall*. Namun dalam perbedaan fenomena yang terjadi dalam setiap variasi, hasil dari aliran dua dimensi pada setiap model uji pun

berbeda-beda pula. Berikut akan dijelaskan pada gambar 4.20 untuk mengetahui lebih jelas perilaku aliran pada setiap variasinya.



Gambar 4.20 Perbandingan vektor kecepatan model uji *ducting* pada jarak $x/D_h = 18$ berdasarkan variasi : a) tanpa *damper* ; b) *damper* 0° ; c) *damper* 30° clockwise ; d) *damper* 30° clockwise

Dari gambar 4.20 dapat dianalisis bahwa dengan bentuk profil kecepatan yang hampir sama dengan bentuk profil kecepatan pada jarak $4D_h$ dari *inlet* akan menghasilkan vektor kecepatan yang baik. Hingga aliran berada pada $x/D_h = 18$, sebagian besar dari model uji didapati aliran sekunder pada setiap variasinya. Tetapi

pada model uji *ducting* dengan melakukan penambahan sudut di *damper*, didapati bentuk aliran sekunder yang sangat kecil bahkan pada salah satu variasinya sudah tidak terdapat aliran sekunder. Hal ini terjadi karena dengan melakukan penambahan sudut pada *damper* akan ikut mempengaruhi bentuk aliran sekunder akibat kelengkungan *elbow*. Sehingga kerugian akibat *separation loss* mampu dikurangi dengan melakukan penambahan bidang gesek pada *ducting*.

Bentuk vektor kecepatan aliran hingga jarak $18D_h$ yang terjadi pada model uji *ducting* tanpa *damper* dan *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 0° hampir sama. Dimana pada daerah *inner wall* masih didapati aliran sekunder yang besar daripada aliran sekunder di daerah *outer wall*. Namun dengan menambahkan sudut bukaan *damper* sebesar 30° terdapat perbedaan yang sangat signifikan. Pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *counter clockwise* masih didapati aliran sekunder yang kecil pada daerah *centerline*, sedangkan pada daerah *outer wall* aliran sekunder yang terjadi lebih kecil daripada aliran sekunder pada daerah *centerline*. Tetapi pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise* sudah tidak terjadi aliran sekunder, dapat dikatakan bahwa pada jarak $18D_h$ aliran pada *ducting* sudah searah dengan aliran saat masuk *ducting*. Sehingga aliran sekunder pengaruh dari kelengkungan *elbow* mampu diatasi pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° *clockwise*.

Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian numerik dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Nilai *pressure drop* pada *ducting* sangat dipengaruhi oleh adanya penambahan sudut bukaan *damper*, arah sudut bukaan *damper* dan bidang gesek baru, untuk bilangan *Reynolds* yang sama pada setiap variasi model uji.
- 2) Nilai *pressure drop* tertinggi terdapat pada variasi model uji *ducting* dengan bukaan sudut *damper* 30° CCW dengan nilai 272,833 pa, sedangkan nilai *pressure drop* pada model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° CW sebesar 263,614 pa. Nilai terendah terdapat pada variasi model uji *ducting* tanpa *damper* dengan nilai 39,886 pa.
- 3) Dari setiap variasi model uji *ducting*, bentuk profil kecepatan hingga jarak $x/D_h=18$ belum didapati fenomena *recovery* aliran karena bila dibandingkan dengan profil kecepatan sisi upstream dari segi bentuk dan besaran tidak sama.
- 4) Jika dilihat dari segi vektor kecepatan pada variasi model uji *ducting* dengan sudut bukaan *damper* 30° CW sudah tidak terlihat aliran sekunder, berbeda dengan 3 variasi lainnya yang masih terdapat aliran sekunder. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *guide vane* saja belum mampu mengatasi kerugian akibat separation loss, namun dengan penambahan *damper* dengan sudut bukaan 30° CW mampu menghilangkan kerugian akibat aliran sekunder.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan baik dari hasil studi numerik, terdapat beberapa hal yang perlu diperbaiki untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih baik pada penelitian

selanjutnya. Beberapa saran yang dapat digunakan sebagai pertimbangan antara lain:

- 1) Memperpanjang saluran udara menjadi 25 hingga 40 D_h pada sisi *downstream*, agar dapat dilihat sejauh mana aliran sudah *fully developed* pada setiap variasi model uji *ducting*.
- 2) Memperbanyak variasi pada bilangan *Reynolds* agar dapat terlihat perbedaannya.
- 3) Membuat *ducting* dengan bentuk penampang persegi 6 agar aliran sekunder pada sudut penampang dapat dihilangkan.
- 4) Membuat *double guide vane* dan *damper* berpenampang *rounded* agar nilai *pressure drop* pada permukaan *guide vane* yang tegak lurus arah aliran dan fenomena separasi pada *guide vane* serta *damper* dapat diminimalkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Danbon, F. & Sollic, C. 2000. Aerodynamic Torque of Butterfly Valve-Influence of an Elbow on The Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque. *J. Fluids Engineering*, vol. 122, p. 337-344.
- Deng, Shi-Ming & Burnett, John. 2000. A Study of Energy Performance of Hotel Buildings In Hongkong. Departement of Building Services Engineering, The Hongkong Polytechnic University. Kowloon. China
- Fox, R.W. & McDonald, A. T dan Pritchard. 2010. Introduction to Fluid Mechanics. 7th edition, John Wiley and Son, Inc.
- Ikhwan, Nur. 2009. Benchmarking Akurasi Pemodelan Turbulensi Dalam Mensimulasikan Aliran Unisotropic Turbulance. Surabaya: Project Grant QUE Project, sub-Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
- Iswati. 2009. Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penambahan Dua Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Horizontal Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds $2,1 \times 10^5$. Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin. FTI-ITS. Surabaya.
- Miller, D.S. 1999. International Flow System, 2nd edition. Bedford: BHRA
- Moujaes, S.F., & Aekula, S. 2009. CFD Predictins and Experimental Comparisons Of Pressure Drop Effects of Turning Vanes in 90° Duct Elbows.
- Nakayama Y., & Boucher R.F. 1999. Introduction to Fluid Mechanics. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Putra, Edo E.S. 2016. Simulasi Numerik Aliran Tiga Dimensi Melalui Rectangular Duct dengan Variasi Bukaam Damper. Tugas Khir. Jurusan Teknik Mesin. FTI-ITS. Surabaya.
- Rup, K., & Sarna, P. 2011. Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow.
- Sutardi, A.W.Wawan, Affan.ibnu, Iswati, & M.D.Sutrisno. 2010. Experimental Study on The Effect of Guide Vane Insertion and Reynolds Numbers on The Flow Pressure Drop in a 90

Rectangular Elbow. Journal. Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya.

Tuakia, Firman. 2008. Dasar-dasar CFD menggunakan Fluent. Informatika, Bandung.

BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak kedua dari 3 bersaudara yang dilahirkan di Gresik, 26 Mei 1993 dengan nama Gladhi Dwi Saputra. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Pongangan 2 Manyar (1999-2005), SMPN 1 Gresik (2005-2008), SMAN 1 Kebomas (2008-2011), Program Studi D3 Teknik Mesin ITS (2011-2014) bidang konversi energi. Pada tahun 2014 penulis melanjutkan jenjang S1 Teknik Mesin FTI – ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2114105017 yang kemudian pada tahun 2016 melakukan penelitian bidang konversi Energi pada laboratorium mekanika dan mesin-mesin fluida.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan baik di bidang akademik maupun non akademik. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan dan bergabung dalam organisasi di Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Mesin FTI – ITS sebagai Staff Departemen Riset dan Teknologi tahun 2012 – 2013, Kepala Departemen Riset dan Teknologi tahun 2013 – 2014, Ketua Divisi Body Manufacturer tahun 2013 – 2016. Serta penulis juga menjadi Juara 1 kategori urban listrik pada ajang *Indonesia Energy Marathon Challenge 2013*.

Penulis sangat tertarik akan perkembangan teknologi di bidang mekanika fluida, ketertarikan dalam berbagai ilmu, dan memiliki keinginan untuk membuat mobil listrik indonesia. Bagi pembaca yang ingin lebih mengenal penulis dan ingin berdiskusi dapat menghubungi e-mail: gladhidwis@gmail.com